

Agnieszka GENEROWICZ¹
Ryszarda IWANEJKO²

MOŻLIWOŚCI PROWADZENIA SELEKTYWNEJ ZBIÓRKI ODPADÓW KOMUNALNYCH PRZY CZĘŚCIOWO NIEPEWNEJ SYTUACJI RYNKOWEJ – PODSTAWY TECHNICZNE I MOŻLIWOŚCI ROZWIĄZAŃ SEGREGACJI

System segregacji odpadów „u źródła” jest początkowym elementem kompleksowego rozwiązania gospodarki odpadami w regionie. Pomimo prostoty rozwiązań technicznych i technologicznych systemu segregacji jego efektywność ekonomiczna i ekologiczna jest zależna od wielu aspektów i parametrów wewnętrznych (poziom i możliwości recyklingu i przetworzenia), jak i uwarunkowań zewnętrznych (warunki rynkowe, współpraca z recyklerami, popyt na produkty z odpadów).

Proces decyzyjny we wszystkich dziedzinach wiąże się z ryzykiem podjęcia nieoptymalnych decyzji, a w przypadku gospodarowania odpadami ich skutkiem mogą być: straty finansowe, nieosiągnięcie wymaganych poziomów odzysku lub recyklingu, szkody środowiskowe, brak akceptacji społecznej.

Celem artykułu jest przedstawienie metodyki podejmowania decyzji i wyboru wariantu segregacji w gospodarstwach domowych, przy częściowo niepewnej sytuacji rynkowej, a co za tym idzie przy istnieniu niepewności co do możliwości przekazania odzyskanych frakcji surowców wtórnych do przetwarzania i recyklingu odzyskanych frakcji.

Ze względu na obszerność tematu, artykuł podzielono na dwie integralne części. Część I artykułu stanowi opis uwarunkowań prawnych i możliwości technicznych rozwiązania selektywnej zbiórki odpadów, jako jednego z elementów kompleksowego systemu gospodarki odpadami. Analiza ta będzie stanowić bazę do podjęcia decyzji w zakresie wprowadzenia rozwiązań technicznych segregacji „u źródła”. Część II artykułu wskazuje kolejne kroki, oparte na odpowiednich metodach matematycznych, które są konieczne do rozwiązania problemu wyznaczenia najkorzystniejszego rozwiązania segregacji odpadów i pozyskiwania z nich frakcji użytkowych.

Słowa kluczowe: odzysk odpadów, segregacja „u źródła”, surowce wtórne, analiza decyzyjna, niepewna sytuacja rynkowa

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Agnieszka Generowicz, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 126282183; agenerowicz@pk.edu.pl

² Ryszarda Iwanejko, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska ul. Warszawska 24, 31 - 155 Kraków; riw@vistula.wis.pk.edu.pl

1. Wprowadzenie

Według ustawy o odpadach (Dz. U. 2013 poz. 21) [16, 17] odzysk to jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku, którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce. Do form odzysku zaliczamy również odzysk energii z termicznego przekształcania odpadów. Jedną z form odzysku jest również recykling, definiowany jako odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w celach pierwotnym lub innych. Obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego (recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do celów wypełniania wyrobisk. Zagadnienia dotyczące wykorzystania odpadów zostały uzupełnione w przepisach prawa pojęciami „ponownego użycia” i „przygotowaniem do ponownego użycia”. Odzysk odpadów musi być rozumiany wyłącznie w sensie recyklingu, przetworzenia i wykorzystania odpadów. Jeżeli tak się nie stanie to gospodarowanie odpadami będzie systemem deficytowym ekonomicznie i szkodliwym dla środowiska. Dla prawidłowego funkcjonowania takiego systemu, konieczne jest, więc zorganizowanie:

- segregacji i odbioru wysegregowanych frakcji do przetworzenia i wykorzystania,
- selektywnej zbiórki odpadów problemowych, w tym m. in. niebezpiecznych, elektrycznych, elektronicznych, wielkogabarytowych, budowlanych itp.,
- gromadzenia i wywozu odpadów zmieszanych.

2. Formy odzysku odpadów segregowanych „u źródła” i możliwości ich przetwarzania

W strukturze systemu gospodarki odpadami wyróżnić można następujące elementy [2,3,5,11]:

- zbiórkę odpadów selektywnie gromadzonych i zmieszanych,
- odbiór i transport wszystkich frakcji,
- recykling surowców,
- inne formy odzysku w tym również odzysk energii,
- ostateczne unieszkodliwienie.

Odpady powinny być zbierane w sposób selektywny. Wg dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Europy 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylającej niektóre dyrektywy, „selektywna zbiórka oznacza zbiórkę, w ramach której dany strumień odpadów obejmuje jedynie odpady jednego rodzaju i o tym samym charakterze w celu ułatwienia specyficznego przetwarzania”. U nas w kraju w tym zakresie obowiązuje rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 29. 12. 2016 r. w sprawie szczegółowego sposobu

selektywnego zbierania wybranych frakcji odpadów (Dz. U. 2017 poz. 19). Rozporządzenie określa: szczegółowy sposób selektywnego zbierania wybranych frakcji odpadów, określa również kiedy wymóg selektywnego zbierania uważa się za spełniony oraz rodzaje odpadów komunalnych podlegające obowiązkowi selektywnego zbierania. Wg rozporządzenia selektywnie zbiera się: papier, szkło, metale, tworzywa sztuczne, odpady ulegające biodegradacji, ze szczególnym uwzględnieniem bioodpadów.

W rozporządzeniu wymóg selektywnego zbierania odpadów uważa się za spełniony, jeżeli:

- 1) na terenie gminy frakcje odpadów są selektywnie zbierane w sposób, o którym mowa w zapisach rozporządzenia, w miejscu ich wytworzenia i na terenach przeznaczonych do użytku publicznego;
- 2) pojemniki oraz worki, zapewniają zabezpieczenie odpadów przed pogorszeniem jakości zbieranej frakcji odpadów dla przyszłych procesów ich przetwarzania (np. są zadaszone, zabezpieczone przed działaniem niepowołanych osób).

Odzysk odpadów, w tym recykling oraz recykling organiczny to kolejny etap mający za zadanie skierowanie do wykorzystania jak największego strumienia odzyskanych frakcji użytkowych.

Ostatni etap to ostateczne unieszkodliwianie odpadów, czyli poddanie odpadów procesom przekształceń biologicznych, fizycznych lub chemicznych (określonym w zał. Nr 6 do ustawy o odpadach), w celu doprowadzenia ich do stanu, który nie stwarza zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi lub środowiska [6, 7].

Zbiórka odpadów obejmuje następujące sposoby organizacji segregacji surowców wtórnych:

- kolorowe kontenery, z których każdy przeznaczony jest na inny rodzaj surowca,
- zbiórka selektywna „u źródła”, która może być realizowana np. jako system dwupojemnikowy: tzw. odpady suche i mokre; system trójpojemnikowy: surowce wtórne, bioodpady, pozostałe odpady zmieszane lub system wielopojemnikowy; każda frakcja zbierana jest w rozdzielaniu na frakcje
- zbiorcze punkty selektywnego gromadzenia, wyposażone w szereg kontenerów, pojemników oraz przygotowanych miejsc do gromadzenia odpadów selektywnie zebranych, (w tym również odpadów niebezpiecznych i problemowych), gdzie obsługa zapewnia kontrolę i bezpieczeństwo dla mieszkańców i środowiska naturalnego.

Uzupełnieniem wyszczególnionych metod segregacji mogą być alternatywne metody gromadzenia odpadów, wymagające rozwiązań na poziomie przepisów prawa lub ogólnokrajowych rozwiązań systemowych, które spowodują, że wysegregowane frakcje stanowią cenny surowiec, a nie odpad. Należą do nich np.:

- system skupu, organizowany jako punkt lub sieć punktów ze zorganizowanym systemem transportu własnym lub recyklera,
- system kaucji zwrotnej, możliwy do zorganizowania w przypadku normalizacji opakowań, dodatkowo musi być zapewnione doczyszczanie gwarantujące pełną sterylność opakowania i jego powtórne wykorzystanie; podobnie jak

w poprzednim przypadku opłacalność ekonomiczna zapewni, że odpady dostarczone przez mieszkańców trafią do recyklingu,

- społeczna zbiórka od ludności, organizowana okresowo jako zbiórka np. odzieży, makulatury w szkołach, leków, odpadów niebezpiecznych, odpadów wielkogabarytowych itp.; taka akcyjna zbiórka stanowi najczęściej uzupełnienie stałych akcji segregacji odpadów.

Efektom segregacji odpadów w gminie są nie tylko surowce, ale również inne frakcje takie jak: odpady niebezpieczne, elektryczne i elektroniczne, budowlane itp. Ich zbiórka jest dużo trudniejsza i skomplikowana, ponieważ przy ich zbiorce i gromadzeniu należy zapewnić pełne bezpieczeństwo ludzi i środowiska naturalnego. Istotne znaczenia dla zbiórki odpadów ma także przepis ustawy z dnia 29 lipca 2005 r. o zużytych sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2005 r., Nr 180, poz. 1495z późn. zm.) [18], zobowiązujący do selektywnego zbierania oraz do nieodpłatnego przyjmowania tego sprzętu, gdy pochodzi on z gospodarstw domowych.

Zbiórka odpadów niebezpiecznych wysegregowanych z odpadów komunalnych (np. baterii, opakowań po środkach czystości, butelek po olejach, świetlówek itp.) na terenie gminy może być realizowana przez zorganizowanie:

- odbioru w wyznaczonym punkcie zbiórki odpadów problemowych jako niezależny punkt zbiórki lub element zakładu gospodarki odpadami. W takim przypadku odpady muszą być dostarczane przez samych mieszkańców do takich punktów. Punkt musi być zamknięty, zabezpieczony, monitorowany i przynajmniej okresowo musi być zatrudniony pracownik obsługujący,
- systematycznego okresowego odbioru odpadów przez specjalistyczny pojazd (mobilny punkt zbiórki odpadów niebezpiecznych), a następnie ich magazynowanie do celów dalszego transportu na terenie gminy lub poza nią,
- zbiórki przy współpracy z właścicielami obiektów handlowych (np. apteki, sklepy oferujące sprzedaż środków ochrony roślin, artykuły fotograficzne, farby i rozpuszczalniki, stacje obsługi samochodów itp.). W takim przypadku właściwe władze samorządowe zawierają umowy z właścicielami obiektów handlowych w zakresie odbioru i przechowywania różnych rodzajów odpadów niebezpiecznych. Odpady te są odbierane przy użyciu specjalistycznego samochodu z obiektów po zgłoszeniu zawiadomienia.

Na mocy ustawy na producentach i importerach wprowadzających na rynek polski urządzenia elektryczne i elektroniczne spoczywa obowiązek zorganizowania i sfinansowania, zbierania, odbioru, przetwarzania, odzysku i recyklingu zużytego sprzętu. Ustawa ta dopuszcza przeniesienie części zobowiązań z wprowadzającego urządzenia na organizację odzysku sprzętu elektrycznego i elektronicznego, a w przypadku wprowadzających sprzęt oświetleniowy nawet zobowiązuje do przeniesienia obowiązków na organizację odzysku sprzętu elektrycznego i elektronicznego (Dz. U. 05.180.1495 z późn. zm).

Po wejściu w życie ustawy z dnia 21 listopada 2008 r. o zmianie ustawy o zużytych sprzęcie elektrycznym i elektronicznym oraz o zmianie niektórych

innych ustaw (Dz. U. z 2008 r., Nr 223, poz. 1464), możliwe są rozwiązania selektywnej zbiórki odpadów elektrycznych, elektronicznych na terenie gminy przez mieszkańców, oddających je bezpłatnie do:

- punktu skupu złomu, który posiada pozwolenie na prowadzenie działalności w zakresie zbierania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego i jest zarejestrowany w Głównym Inspektoracie Ochrony Środowiska GIOŚ. Punkty złomu nie mogą traktować zużytych pralek, lodówek ani zmywarek jako złomu i rozbierać ich na części w nieodpowiednich warunkach. Włączenie punktów skupu złomu ma ograniczyć szarą strefę nierejestrowanego przepływu elektro-śmieci oraz gwarantować ich prawidłowe i bezpieczne przetworzenie,
- punktu serwisowego, w przypadku, gdy koszt serwisu jest wyższy niż cena zakupu nowego urządzenia lub gdy naprawa jest nieskuteczna. Serwisant może odmówić przyjęcia zużytego sprzętu, gdy klient przyniesie go z zamiarem pozbycia się, a nie naprawy oraz gdy stare urządzenie stanowi zagrożenie dla zdrowia lub życia pracowników,
- sklepu lub hurtowni, w momencie zakupu nowych urządzeń na zasadzie wymiany (1 za 1, czyli stary sprzęt za nowy). Transport trzeba zapewnić we własnym zakresie lub uzgodnić w sklepie odpłatnie.
- specjalnego punktu zbierania, który znajduje się w gminie. Transport trzeba zapewnić we własnym zakresie.

Odpady wysegregowane „u źródła” trafiają do sortowni, a następnie do procesów recyklingu. Materiał lub substancja w procesie recyklingu muszą uzyskać taką formę, aby nadawały się do wykorzystania. Sortownia może pracować segregując:

- różne frakcje użytkowe z segregacji wielopojemnikowej „u źródła” w celu ich uzdatnienia i przekazania do przetworzenia,
- odpady z segregacji dwupojemnikowej (zmieszane surowce wtórne), w celu ich rozdzielenia, uzdatnienia i przekazania do sprzedaży lub wykorzystania,
- odpady surowe, zmieszane, częściowo segregowane na frakcje użytkowe, kierowane do wykorzystania oraz pozostałość po sortowaniu, kierowana np. do spalania z odzyskiem energii lub do składowania
- odpady jednorodne ze znanego źródła kierowane do wykorzystaniu lub do przetworzenia i wykorzystania np. budowlane.

Uzdatnianie odpadów i przygotowanie ich do wykorzystania odbywa się w sortowniach. Ich podstawowym zadaniem jest:

- rozdzielenie frakcji użytkowych od pozostałych,
- rozdzielenie frakcji palnych od pozostałych,
- waloryzacja, czyli powtórna selekcja i czyszczenie odpadów dostarczanych z segregacji „u źródła” lub z kontenerów,
- rozdrabnianie celem wykorzystania jako paliwa,
- rozdrabnianie i prasowanie celem ułatwienia transportu,
- czasowe magazynowanie odzyskanych surowców.

Wysegregowane frakcje są umieszczane w kontenerach, poddawane prasowaniu lub belowaniu w celu optymalizacji ich transportu. Tak przygotowane są najczęściej magazynowane na terenie sortowni do czasu odbioru.

3. Matematyczne ujęcie problemu wyboru systemu segregacji odpadów komunalnych „u źródła”

Wybór najlepszej metody segregacji odpadów powinien być poprzedzony udzieleniem sobie odpowiedzi na podstawowe, wiążące się ze sobą pytania:

- jakie są możliwe warianty i możliwości techniczne rozwiązania zbiórki odpadów selektywnie gromadzonych?
- co z nimi później można będzie zrobić, czyli jakie będą warunki gospodarcze wykorzystania ich?
- co tak naprawdę chcemy osiągnąć a czego chcemy uniknąć, czyli jakie są kryteria wyboru systemu segregacji i ich przetworzenia?
- jak bardzo niepewna jest przyszłość, w zakresie możliwości odzysku i recyklingu odpadów, czyli jaka jest sytuacja decyzyjna?

Pytanie pierwsze wiąże się z możliwościami zbiórki odpadów w gospodarstwach domowych. Odzysk frakcji surowcowej, wysegregowanej z odpadów komunalnych jest możliwy po rozmieszczeniu kolorowych pojemników (lub worków) w poszczególnych gospodarstwach domowych (najczęściej jednorodzinnych). Później pozyskane surowce po procesach sortowania (przesiewanie, odzysk ręczny lub fotooptyczny, separatory mechaniczne) nadają się do sprzedania jako cenna frakcja użytkowa. Taka zbiórka może być realizowana jako:

- system dwupojemnikowy: odpady suche (wszelkie czyste surowce wtórne odbierane i zawożone do sortowni, gdzie rozdzielone będą na poszczególne frakcje) i mokre (pozostałe, frakcje, w tym organiczne, które będą poddawane stabilizacji biologicznej lub spalaniu przed ostatecznym składowaniem);
- system trójpojemnikowy: surowce wtórne (np. szkło białe i kolorowe, papier i tworzywa sztuczne, metale), bioodpady (przeznaczone do stabilizacji biologicznej w procesie fermentacji beztlenowej lub kompostowania) oraz pozostałe odpady, które po przetworzeniu również będą składowane,
- system wielopojemnikowy; każda frakcja zbierana jest oddzielnie, czyli szkło białe, kolorowe, metal, tworzywa sztuczne, papier, odpady organiczne, odpady niebezpieczne itd.

Warianty projektowe można opisać poprzez tzw. atrybuty, czyli ich cechy (np. parametry, koszty), które charakteryzują warianty w sposób niezależny od decydenta. System zbiórki wielopojemnikowej pozwala na zebranie bardzo czystej frakcji surowcowej, nadającej się bezpośrednio do recyklingu, bez późniejszych procesów doczyszczania i waloryzacji, pozwala na oddzielenie odpadów niebezpiecznych z odpadów komunalnych. System taki ma jednocześnie wady, wśród których najistotniejszą są koszty, ale również zapewnienie miejsca do tak szczegółowej segregacji. Mniejsza ilość pojemników generuje niższe koszty, ale

wysegregowane frakcje potrzebują dodatkowych procesów doczyszczania i waloryzacji. Od organizacji systemu segregacji i selektywnej zbiórki od mieszkańców zależy będzie dalsze przetwarzanie odpadów oraz możliwości ich zbycia, recyklingu i wykorzystania, gdyż bezpośrednio po segregacji odpady kierowane są do sortowni, która może funkcjonować jako sortownia frakcji czystej (pozyskanej z selektywnej zbiórki) lub frakcji zmieszanej. Dlatego równocześnie z pytaniem pierwszym należy od razu zadać sobie kolejne pytanie.

Pytanie drugie wynika z konieczności uwzględnienia możliwych warunków gospodarczych (sytuacji rynkowej), które niezależnie od decydenta i mieszkańców mogą zaistnieć w przyszłości. W najprostszym przypadku można wyróżnić trzy rozłączne i uzupełniające się sytuacje:

- „słabe warunki rynkowe”, gdy wystąpi małe zapotrzebowanie na surowce wtórne, czyli nie ma możliwości pozbycia się odzyskanych „u źródła” frakcji lub te możliwości są niewielkie z uwagi na brak popytu i niskie ceny; wówczas zbiórka selektywna jest nieopłacalna ekonomicznie tak bardzo, że surowce trafiać będą na składowisko odpadów,
- „średnie warunki rynkowe”, gdy wystąpi średnie zapotrzebowanie na surowce wtórne, wówczas tylko część odzyskanych frakcji będzie kierowana do recyklingu i działalność ta będzie ekonomicznie słabo lub średnio opłacalna,
- „dobre warunki rynkowe”, gdy wystąpi duże zapotrzebowanie na surowce i wszelkie odzyskane frakcje; będą one sprzedawane i poddawane procesom recyklingu i będzie to proces opłacalny ekonomicznie.

Pytanie trzecie wiąże się z wyborem kryteriów, które powinien spełniać wybrany wariant projektowy. Kryteria powinny być niesprzeczne, powinny zapewnić wyczerpywalność, spójność i niepowtarzalność oceny. W zastosowaniach inżynierskich zazwyczaj uwzględnia się kryteria ekonomiczne (z podziałem na jednorazowe koszty inwestycyjne i ponoszone stałe koszty eksploatacyjne), techniczne /technologiczne, ekologiczne, społecznościowe. W praktyce niektóre kryteria mogą być tzw. ilościowe a inne jakościowe. Kryteria ilościowe (mieralne) to takie, które odnoszą się do cech policzalnych. Atrybuty, które podlegają ocenie przez takie kryteria są zazwyczaj są wyrażane w miarach bezwzględnych (np. wielkości nakładów, zysków lub strat wyrażone w odpowiednich jednostkach monetarnych) lub względnych (np. udział obrotów przedsiębiorstwa na danym rynku wyrażony w skali procentowej). Kryteria jakościowe (niemieralne) to takie, które odnoszą się do cech niepoliczalnych (np. stopień funkcjonalności, nowoczesności, komfortu, efektywność ekologiczna, czy estetyka). Odpowiednie atrybuty są wówczas wyrażane w umownych punktowych skalach względnych, przez co w pewnym stopniu mogą być ocenami subiektywnymi. W ogólnym przypadku przykładowymi kryteriami w problemie zbiórki odpadów mogłyby być maksymalny zysk ze sprzedaży pozyskanych frakcji, maksymalny recykling surowców, minimalne koszty czy zaoszczędzona pojemność składowiska odpadów.

Pytanie czwarte jest związane z możliwością trafnego przewidzenia przyszłości. Niepewność przyszłości prawie zawsze niesie ryzyko podjęcia błędnych decyzji, których skutkiem może być nieosiągnięcie w oczekiwanym stopniu zamierzonego celu, wygenerowanie strat zamiast zysków czy nawet utrata bezpieczeństwa ekologicznego. Wspominane ryzyko zależy od tzw. sytuacji decyzyjnej lub warunków podejmowania decyzji. W zależności od zakresu i wiarygodności posiadanych informacji i prognoz, mogą to być [1, 4, 12, 13, 14, 19]:

- warunki pewne lub zdominowane,
- warunki losowe lub warunki ryzyka,
- warunki niepewności (całkowitej),
- warunki pośrednie między warunkami losowymi a niepewnymi, nazywane tutaj warunkami częściowej niepewności.

Dla warunków pewnych decydent posiada pełną informację o przyszłości tj. o okolicznościach, które w przyszłości miałyby wpływ na rezultat podjętej decyzji. Wówczas efekt podjęcia każdej decyzji może zostać ściśle oszacowany lub przewidziany jeszcze przed jej podjęciem i jeżeli analizy takie zostaną przeprowadzane prawidłowo, to brak jest ryzyka podjęcia złej decyzji. W takiej sytuacji stosuje się klasyczne metody optymalizacji jedno- lub wielokryterialnej, ciągłej lub dyskretnej. Sytuacja jest najprostszą, gdy problem wyboru opiera się tylko na jednym kryterium (np. minimum kosztów albo maksymalny stopień odzysku). Wówczas stosuje się metody optymalizacji jednokryterialnej (np. rachunku różniczkowego, jeśli funkcję celu można przedstawić w postaci analitycznej, metodę SYMPLEKS, gdy zarówno funkcja celu jak i ograniczenia są liniowe czy metodę przeglądu wariantów w innych przypadkach). Trudności pojawiają się w sytuacji, gdy należy uwzględnić kilka kryteriów wyboru równocześnie, a pewne wartości powinny być maksymalizowane (np. zyski) a inne minimalizowane (np. koszty). W rzeczywistości kryteria, które należałoby uwzględnić, najczęściej są przeciwstawne, co oznacza, że nie istnieje jedno rozwiązanie, które byłoby najlepsze ze względu na wszystkie kryteria oceny jednocześnie. W sytuacji, gdy poszukuje się najlepszego, spełniającego szereg kryteriów, wariantu projektowego można określić zbiór rozwiązań kompromisowych, można jedno z kryteriów ustalić jako kryterium główne a inne jako kryteria drugorzędne, można określić tzw. ustępstwa albo też określić wagi dla poszczególnych kryteriów i utworzyć tzw. mega-kryterium. Najczęściej jednak decydent jest zainteresowany pełnym uporządkowaniem rozwiązań polioptymalnych i wskazaniu jednego „najlepszego” rozwiązania, które uwzględniałoby jego subiektywne preferencje. Obecnie uważa się, że najlepsza w takich sytuacjach jest opracowana przez Saaty’ego metoda wielokryterialnego wyboru AHP (Analytical Hierarchy Process). Rezultatem zastosowania metody AHP, oprócz wskazania najlepszego rozwiązania jest ranking wszystkich wariantów. Metoda ta zostanie szczegółowiej przedstawiona w dalszej części artykułu.

Dla warunków losowych możliwe jest określenie prawdopodobieństw zaistnienia w przyszłości tzw. stanów natury (czyli okoliczności niezależnych od

decydenta mających wpływ na rezultat działań decydenta), co oznacza, że z wyprzedzeniem można określić prawdopodobieństwa wystąpienia różnych skutków podjęcia każdej z decyzji. Stosuje się metody macierzy i drzew decyzyjnych, a jako kryterium wyboru przyjmuje się np. maksimum wartości oczekiwanej zysku lub minimum kosztów przy wielokrotnym dokonywaniu wyboru albo maksimum funkcji użyteczności przy wyborze jednokrotnym. Przy czym użyteczność jest umowną miarą stopnia osiągnięcia celu i zależy od preferencji decydenta i od sytuacji.

Dla warunków całkowicie niepewnych nie są znane prawdopodobieństwa zaistnienia możliwych stanów natury, a więc nie można wyznaczyć prawdopodobieństw a czasem nawet zakresów możliwych skutków. W takiej sytuacji stosuje się metody analogiczne jak dla sytuacji losowej, jednakże kryterium wyboru zależy od osobistych preferencji decydenta, czyli od jego stosunku do ryzyka (np. skłonność czy awersja do ryzyka).

Dla pośrednich warunków częściowej niepewności dostępne są jedynie niepełne informacje o możliwości wystąpienia w przyszłości określonych stanów natury. Wówczas można określić jedynie przedziały zmienności prawdopodobieństw ich zajść lub relacje między nimi. W takiej sytuacji można stosować metody tzw. nieostrego modelowania, z których matematycznie najprostszymi są metody niepełnej informacji liniowej (NIL) [9, 10, 15]. W praktyce właśnie takie przypadki najczęściej mają miejsce.

4. Rzeczywisty problem wyboru systemu segregacji odpadów komunalnych „u źródła”

Sposób segregacji odpadów komunalnych „u źródła” jako najlepszy przeanalizowano dla danej jednostki osadniczej (o ilości mieszkańców 45 tys.). Jednostka ma charakter małego miasta, które stanowi sypialnię większego, położonego blisko (20÷40 km). Charakterystyki odpadów będą więc podobne jak w dużym mieście, czyli duża ilość surowców wtórnych i odpadów organicznych. Niewielka ilość zabudowy wielorodzinnej, brak większego przemysłu, ale dużo drobnych warsztatów.

Do dalszych analiz przyjęto przypadek, gdy w odebranych od mieszkańców odpadach jest frakcji surowej 50%, frakcji organicznej 25% całej masy odpadów a resztę stanowią odpady zmieszane, zanieczyszczone (np. popiołem); w tym również niebezpieczne. W przypadku segregacji dwupojemnikowej założono odzysk wyłącznie frakcji surowcowej odpadów, a następnie ich recykling. W przypadku segregacji trójpojemnikowej oprócz frakcji surowcowej założono również odzysk i recykling odpadów organicznych. W segregacji wielopojemnikowej dodatkowo można również wziąć pod uwagę odzysk i recykling odpadów budowlanych, niebezpiecznych, zielonych oraz oczywiście frakcji odpadów organicznych i wysoki poziom recyklingu odpadów surowcowych, zakładając 50% poziom recyklingu osiągnięty w roku 2020.

Dla przedstawionej gminy wskazano możliwe sposoby zbiórki odpadów, przedstawić istotne kryteria wyboru, oszacować wartości funkcji kryterialnych cech poszczególnych wariantów i dokonać wyboru najlepszego wariantu sposobu segregacji. Kolejność wymienionych poniżej wariantów i kryteriów jest przypadkowa i nie wynika z żadnych preferencji. Warianty segregacji odpadów, które mogą być realizowane w danej gminie zależą od możliwości tej gminy i poziomu edukacji ekologicznej mieszkańców. W ogólnym przypadku możliwe są dwa rozwiązania:

- dla gmin niewielkich nie mających zbyt wielu możliwości prowadzenia gospodarki odpadami na podstawie rozwiązań stosowanych w wojewódzkich planach gospodarki odpadami, można przyjąć, że gmina narzuca jedną z przedstawionych poniżej metod dla wszystkich mieszkańców; warianty te mogą być realizowane jedynie całościowo, oznaczono je jako:
 - W1- system dwupojemnikowy,
 - W2 - system trójpojemnikowy,
 - W3 - system wielopojemnikowy;
- dla takich gmin, które dysponują różnymi możliwościami prowadzenia gospodarki odpadami (np. sortownie, kompostowanie, spalarnie); dopuszcza się warianty polegające na realizacji odmiennych typów segregacji dla różnych grup mieszkańców (zabudowa jedno- i wielorodzinna) lub różnych rejonów gminy; przykładowymi alternatywnymi wariantami mogłyby być:
- V1 – gdy znacznie więcej mieszkańców (np. 50%-70%) wykorzystuje system dwupojemnikowy, mniej system trójpojemnikowy (np. 20%-30%), a najmniej system wielopojemnikowy (np.10%-20%),
- V2 – gdy system dwupojemnikowy wykorzystuje mniej mieszkańców (np. 20%-30%), najwięcej system trójpojemnikowy (np. 50%-70%), a system wielopojemnikowy (np.10%-20%),
- V3 – gdy system dwupojemnikowy wykorzystuje mało mieszkańców (np. 10%-20), więcej system trójpojemnikowy (np. 20%-30%), a najwięcej system wielopojemnikowy (np.50%-70%).

Wybór jednego z tych dwóch rozwiązań, nie wpływa na przedstawioną w dalszej części metodykę poszukiwania optymalnej decyzji wyboru sposobu segregacji odpadów „u źródła”, dlatego w dalszej części zastosowano jednolite oznaczenia W1, W2 i W3 i gdy mowa będzie np. o segregacji dwupojemnikowej należy przez nią rozumieć, w zależności od przyjętego rozwiązania, albo wyłączną segregację dwupojemnikową albo segregację mieszaną z przewagą segregacji dwupojemnikowej.

Przyjęto, że na wybór optymalnego rozwiązania mają wpływ trzy kryteria: dwa przeciwstawne wysuwane przez odbiorcę odpadów (gminę lub przedsiębiorstwo gospodarki odpadami) i jedno istotne dla mieszkańców gminy. Są to kryteria uwzględniające:

- K1 – koszty funkcjonowania systemu gospodarki odpadami,

- K2 – korzyść dla gminy lub przedsiębiorstwa gospodarki odpadami z przeprowadzanej przez mieszkańców segregacji u źródła;
- K3 – obciążenie i trudności dla mieszkańców związane z procesem segregacji „u źródła”.

Kryterium kosztowe K1 uwzględnia koszty ponoszone w związku z odbiorem odpadów i ich późniejszą segregacją. Przy braku segregacji odpadów przez mieszkańców odbiór z każdego punktu odbywałby się przeciętnie 2 razy w tygodniu, do czego wystarczyłyby zwykle samochody śmieciarki. Przy dokonywaniu segregacji odpadów przez mieszkańców odbiór poszczególnych typów odpadów musiałby być częstszy i wymagałby użycia różnych rodzajów samochodów. Koszty są również generowane podczas samego procesu segregacji wtórnej przeprowadzanej w sortowni lub instalacji mechaniczno- biologicznego przetwarzania odpadów. Jest oczywiste, że gmina lub przedsiębiorstwo gospodarki odpadami jest zainteresowane ponoszeniem jak najniższych kosztów swojej działalności, gdyż wtedy osiąga większy zysk - dlatego kryterium K1 musi być minimalizowane.

Kryterium korzyści K2 łącznie ujmuje możliwy do uzyskania przy danym sposobie przeprowadzania segregacji odpadów przez mieszkańców stopień odzysku i recyklingu. Można założyć stałość rozkładu między odzyskiem i recyklingiem (przeciętnie po ok. 50%), co jest związane z charakterem gminy. Odbiorca odpadów na ogół jest zainteresowany jak najdokładniejszym przeprowadzaniem segregacji „u źródła”. Im dokładniejsza segregacja „u źródła” przeprowadzana przez mieszkańców i im lepsza sytuacja gospodarcza, tym większe będą korzyści / zyski. Dlatego kryterium K2 musi być maksymalizowane. W przeprowadzanej analizie pominięto kryterium maksymalnego zaoszczędzania miejsca na składowisku, gdyż jest ono zgodne z kryterium K2.

Kryterium obciążeniowe K3 to kryterium społeczne uwzględniające stanowisko mieszkańców gminy w sprawie prowadzonej segregacji, które łącznie ujmuje kryteria cząstkowe: 1^0 – wielkość opłat ponoszonych przez mieszkańców, 2^0 – uciążliwości związanej z segregacją odpadów, 3^0 – możliwości wygospodarowania miejsca na postawienie kontenerów lub pojemników na odpady. To kryterium powinno być minimalizowane.

Przyjęte powyżej wszystkie kryteria należy potraktować jako mierzalne, przy czym wartości atrybutów (cech) poszczególnych wariantów projektowych, w zależności od kryterium wyrażono w dalszej części na podstawie doświadczenia. Dla dwóch pierwszych kryteriów wartości te są w oczywisty sposób zależne od mogącej w przyszłości wystąpić tzw. sytuacji gospodarczej, a dla kryterium trzeciego nie ma takiej zależności, ponieważ w rzeczywistości nie można zbyt dokładnie przewidzieć przyszłości tzn. nie można ocenić przyszłego „zapotrzebowania” ze strony przemysłu recyklerskiego na odzyskane lub wysegregowane surowce wtórne. Problem ten należy rozważać jako problem w tzw. pośredniej sytuacji decyzyjnej (tj. przy niepełnej informacji). Zakłada się, że w przyszłości możliwe są trzy przedstawione wcześniej sytuacje gospodarcze:

- S1 – słabe warunki rynkowe,
- S2 – średnie warunki rynkowe,
- S3 – dobre warunki rynkowe.

Dla tak określonych warunków gospodarczych wartości atrybutów przedstawionych powyżej rozwiązań wariantowych względem przyjętych kryteriów oceny określono:

- dla K1 - w skali punktowej (0-10), przy czym ocena 10 punktów odpowiada najwyższemu kosztom (ocena najgorsza); w każdej sytuacji rynkowej najtańszy jest wariant W,1 a najdroższy jest wariant W3, przy czym im lepsza sytuacja gospodarcza tym wyższe koszty, co wynika z warunków rynkowych prowadzenia systemu segregacji (tab.1),
- dla K2 – w skali procentowej względnej tj. odniesione do maksymalnego zysku, który jest możliwy dla sytuacji gospodarczej S3 (dobry zbytni surowiec z segregacji) jeśli mieszkańcy stosują najdokładniejszą segregację (wariant W3), najmniejsze korzyści gmina osiąga przy braku segregacji (tab.2);
- dla K3 - w skali procentowej, przy czym wartości atrybutów poszczególnych wariantów segregacji stanowią odsetek mieszkańców gminy preferujących dany sposób segregacji; wartości te zostały oszacowane na podstawie rozpoznania i konsultacji społecznych i praktycznie nie zależą od mogącej zaistnieć w przyszłości sytuacji gospodarczej, (tab.3).

Tabela 1. Szacunkowe wartości atrybutów wariantów projektowych ze względu na kryterium kosztów K1 dla różnych warunków rynkowych [opracowanie własne]

Table 1. Estimated value of the design variant attributes for the K1 cost criterion for different market conditions [own elaboration]

Systemy segregacji	WARUNKI RYNKOWE		
	S1	S2	S3
W1, V1	1	1,5	5
W2, V2	2	3	7,5
W3, V3	3	5	10

Tabela 2. Szacunkowe wartości atrybutów wariantów projektowych ze względu na kryterium korzyści K2 dla różnych warunków rynkowych [opracowanie własne]

Table 2. Estimated attribute values for design variants based on the K2 benefit criterion for different market conditions [own elaboration]

Systemy segregacji	WARUNKI RYNKOWE		
	S1	S2	S3
W1, V1	5%	10%	25%
W2, V2	10%	20%	55%
W3, V3	20%	50%	100%

Tabela 3. Szacunkowe wartości atrybutów wariantów projektowych ze względu na kryterium obciążenia mieszkańców K3 niezależne od warunków rynkowych [opracowanie własne]

Table 3. Estimated values of design variant attributes due to the K3 population load factor independent of market conditions [own elaboration]

Systemy segregacji	WARUNKI RYNKOWE
	S1, S2 albo S3
W1, V1	30%
W2, V2	50%
W3, V3	20%

Postawione zadanie należy rozwiązywać etapowo. Najpierw, oddzielnie dla wszystkich trzech sytuacji gospodarczych (S1, S2, S3) należy wskazać najlepszy wariant segregacji. W tym celu kolejno zakłada się pewność co do wystąpienia każdej sytuacji, a wówczas wyboru jednego z trzech wariantów (W1, W2, W3) dokonuje się stosując metodę wielokryterialnego wyboru AHP. Rezultatem zastosowania tej metody jest ranking wariantów (tu: metod segregacji odpadów u źródła) dla określonych (zdeteminowanych) warunków (tu: sytuacji gospodarczej). Na koniec należy uwzględnić posiadane informacje co do możliwości wystąpienia poszczególnych sytuacji gospodarczych i zastosować metodę NIL, co pozwala na wskazanie jednego wariantu najlepszego w przypadku częściowo niepewnej przyszłości dla wszystkich sytuacji gospodarczych łącznie.

5. Podsumowanie

- Zagadnienia przedstawione w tej części stanowią wstęp i bazę do przeprowadzenia koniecznych analiz matematycznych dla problemu wyboru decyzji o sposobie segregacji odpadów „u źródła”. Takie przykładowe analizy są zamieszczone w drugiej części artykułu.
- Segregacja odpadów komunalnych stanowi pierwszy i integralny element kompleksowego systemu gospodarki odpadami, bez rozwijania którego nie byłoby możliwości rozbudowy kolejnych elementów, recyklingu i przetwarzania. Jego prawidłowe rozwiązanie niejednokrotnie stanowi kluczowy i pierwszy krok całego systemu, a jego zaniedbanie powoduje, że nie ma możliwości rozwoju kolejnych etapów. Rozwój segregacji „u źródła” i decyzja dotyczące jego kształtu jest zazwyczaj podejmowana na poziomie samorządu terytorialnego lub zakładu gospodarki komunalnej i stanowi trudne zadanie decyzyjne, z uwagi na konieczność pogodzenia wielu interesów i sprzecznych ze sobą celów np. interesu mieszkańców, zakładu gospodarki odpadami czy recyklerów, do których mają trafić zebrane odpady.
- Aby zarządzanie każdym przedsiębiorstwem czy przedsięwzięciem, a więc też i zbiórką, i zagospodarowaniem odpadów, było bardziej efektywne, powinno wykorzystywać matematyczne metody wspomaganie decyzji.

- W celu wskazania najlepszego sposobu segregacji odpadów „u źródła” dla przedstawionego powyżej przykładu zaproponowano kombinację metody wielokryterialnego wyboru AHP oraz metodę decyzyjną NIL. Metodę wyboru najlepszego sposobu segregacji odpadów „u źródła” szczegółowo przedstawiono w II części artykułu.

Literatura

- [1] Aczel A.D.: Statystyka w zarządzaniu, PWN, Warszawa, 2000.
- [2] Bilitewski B., Härdtle G., Marek K.: Podręcznik gospodarki odpadami – teoria i praktyka, Wydawnictwo Seidel – Przywecki sp. z o.o, Warszawa, 2006.
- [3] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Dz.U.UE.L.08.312.3).
- [4] Dryja M., Jankowska J., Jankowski M.: Przegląd metod i algorytmów numerycznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, część 2. Warszawa 1982.
- [5] Generowicz A.: Multi-criteria analysis of waste management in Szczecin, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 23, No. 1, 2014, pp 57-63.
- [6] Generowicz A., Iwanejko R.: Wybór optymalnego rozwiązania systemu selektywnej zbiórki odpadów komunalnych przy niepewnej sytuacji rynkowej, Logistyka Vol. 3, 2015, 1414– 1422.
- [7] Iwanejko R.: Generowicz A., Ocena wariantów segregacji odpadów komunalnych „u źródła” z wykorzystaniem analizy decyzyjnej AHP, Gaz Woda Technika Sanitarna, Vol. 2016, pp. 266 – 271,
- [8] Iwanejko R., Generowicz A., Klasyfikacja przyczyn pożarów i ocena ryzyka ich występowania w obiektach gospodarki odpadami komunalnymi w aspekcie start ekonomicznych, ekologicznych i społecznych, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury JCEEA, 32 (62) /1, 2015, pp. 137 – 152,
- [9] Iwanejko R., Rybicki S.M.: Praktyczne aspekty stosowania metody hierarchicznego wyboru AHP w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Zaopatrzenie W Wodę, Jakość I Ochrona Wód”, Poznań 2008.
- [10] Kofler E.: Podejmowanie decyzji przy niepełnej informacji, Real Publishers, Zurych, 1993.
- [11] Kulczycka J., Generowicz A. Kowalski Z.: Strength and Weakness of Municipal and Packaging Waste System in Poland; book project under the working title "Integrated Waste Management – Volume I", August 2011; Publisher InTech; Edited by: Sunil Kumar.
- [12] Miller D.W., Stark M.K.: Praktyka i teoria decyzji, PWN, Warszawa 1971.
- [13] Moore P.G., Ryzyko w podejmowaniu decyzji, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1975.
- [14] Rolad H.A., Moriarty B.: System Safety Engineering and Management, Jon Wiley & Sons. Inc., 1990.
- [15] Saaty T.L.: The Analytic Hierarchy Process, New York, Mc-Graw Hill, 1980.
- [16] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2013. 0. 21).

- [17] Ustawa z dnia 25 stycznia 2013 r. o zmianie ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz. U. 2013. 0. 228).
- [18] Ustawa z dnia 29 lipca 2005 r. o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2005 r., Nr 180, poz. 1495 z późn. zm.).
- [19] Żak J.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, ss.46-73, 2005.

POSSIBILITY OF CONDUCTING SELECTIVE COLLECTION OF MUNICIPAL WASTE AT SOME PRECARIOUS MARKET SITUATION – TECHNICAL BASICS AND POSSIBILITIES OF SEGREGATION SYSTEM SOLUTION

S u m m a r y

The waste segregation system is the starting point for a comprehensive waste management solution in the region. In spite of the simplicity of the technical and technological arrangements of the segregation system, its economic and environmental efficiency depends on many aspects and internal parameters (level and capacity of recycling and processing) as well as external conditions (market conditions, cooperation with recyclers, demand for waste products).

Decision-making in all areas entails the risk of non-optimal decisions, and in the case of waste management, they can result in: financial losses, failure to meet the required levels of recovery or recycling, environmental damage, lack of social acceptance.

The aim of this article is to present the methodology for decision making and the choice of segregation option in households, with some uncertain market situation, and consequently the uncertainty as to the possibility of transferring recycled fraction of recycled materials to the processing and recycling of recovered fractions. Because of the breadth of the topic, the article is divided into two integral parts. Part I of the article describes legal conditions and technical possibilities of selective waste collection as one of the elements of a comprehensive waste management system. This analysis will be the basis for deciding on the introduction of technological solutions for segregation at source. Part II of the article shows the steps followed by the appropriate mathematical methods that are needed to solve the problem of determining the best solution for the segregation of waste and the utilization of the utility fractions.

Keywords: municipal waste recovery, source segregation, secondary raw materials, decision analysis, uncertain market situation

Przesłano do redakcji: 24.11.2017 r.

Przyjęto do druku: 31.01.2018 r.