

Piotr Kisiel*, Bożena Zwolińska**, Paweł Gara*

Systemowe podejście do problemu zagospodarowania odpadów przemysłowych

1. Wprowadzenie

Zasady zrównoważonego rozwoju są jednym z istotnych elementów rozwoju społeczno-gospodarczego. Obecnie wskutek wieloletnich praktyk, stawiane wymagania wobec rozwiązań proekologicznych obejmują: minimalizację masy wytwarzanych odpadów z sektora przemysłowego, właściwej ich segregacji oraz odpowiedniego składowania i recyklingu. Rozwiązania techniczno-technologiczne powinny spełniać w pierwszej kolejności wymagania proekologiczne równorzędnie z rachunkiem ekonomicznym. Kompleksowe ujęcie problemu zagospodarowania odpadów uwzględnia wszystkie procesy i działania związane z wytwarzaniem odpadów, procesami magazynowania i transportowania oraz jeśli zachodzi konieczność – również składowania. W celu maksymalnego ograniczenia masy strumieni odpadów kierowanych na składowiska należy zintensyfikować procesy związane z wykorzystaniem pozostałości w obrębie podsystemów ogólnego (nadrzędnego) systemu zagospodarowania odpadów np. krajowego systemu gospodarki odpadami. Skutki działań proekologicznych mają bezpośrednie wpływ wyniki gospodarcze, ponieważ obecnie dobry wyrób finalny przedsiębiorstwa to nie tylko ten, który spełnia kryteria jakościowe, co do odpowiedniej wytrzymałości, niezawodności oraz minimalnych kosztów, ale również taki, który uwzględnia aspekty proekologiczne.

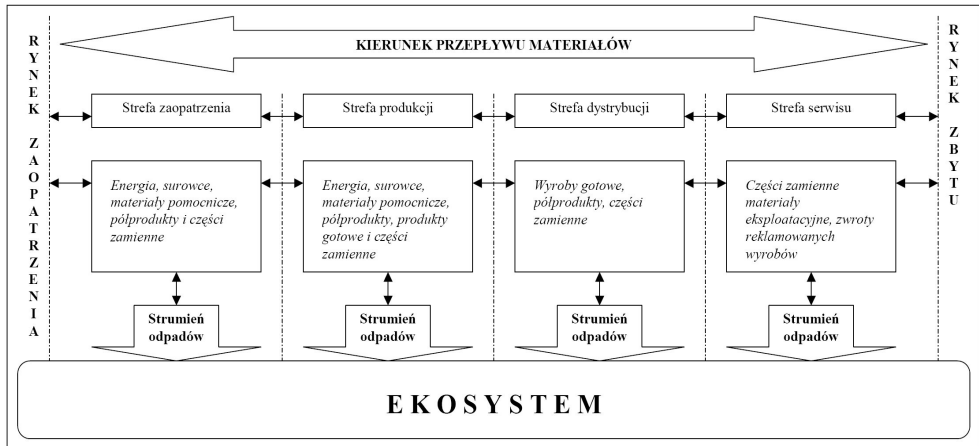
2. Strumienie przepływów w systemach gospodarczych

Na rynku konsumenckim wszystkie produkty trafiające do klienta to wyroby będące efektem kolejno występujących po sobie procesów technologicznych. Niewielka tylko część surowców naturalnych w postaci nieprzetworzonej gotowa jest do bezpośredniego użycia i trafia do odbiorcy. Pozostałości z procesów przetwórczych i konsumpcyjnych generowane są na każdym etapie łańcucha produkcyjnego. Każda faza procesu generuje

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Wytwarzania

** Podkarpacka Szkoła Wyższa im. bł. ks. Władysława Findysza, Wydział Ekonomii i Transportu

pewną ilość odpadów. Rodzaj, ilość i jakość wytworzonych odpadów uzależniona jest od branży przemysłowej, od klasy zastosowanej technologii oraz od rodzaju i jakości substytutów i produktów wejściowych do przedsiębiorstwa. Rysunek 1 przedstawia kierunki przepływu strumieni odpadów z elementarnych jednostek systemu gospodarczego.



Rys. 1. Kierunki przepływu strumieni generowanych odpadów [1]

Generowane odpady trwale naruszają ekologiczną równowagę. Środowisko naturalne spełnia dwie funkcje niezbędne do rozwoju gospodarczego świata: jest źródłem surowców naturalnych oraz odbiorcą powstających pozostałości. Działania człowieka polegające na nieracjonalnym użytkowaniu zasobów środowiskowych nie mogą istnieć bez ograniczeń proekologicznych, ponieważ ekosystem nie jest w sposób nieograniczony pełnić funkcji regulacyjnej. Jednym z większych obciążeń środowiskowych są strumienie pozostałości skierowane na składowiska. Pomimo iż składowanie odpadów z założenia jest działaniem ostatecznym, nieniwelującym destrukcyjnego wpływu na ekosystem, jednak jest jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań ze względu na korzyści wynikające z rachunku nakładów finansowych.

3. Systemowe ujęcie zagospodarowania odpadów

Według jednej z równoważnych definicji G.J. Klira, za system uznaje się określony zbiór n elementów i ich zachowań oraz zbiór sprzężeń między elementami i między otoczeniem [2]. Podejście to często stosowane jest przy badaniu i analizowaniu procesów technologicznych. Systemem zagospodarowania odpadów nazywamy celowo wyodrębniony obiekt rzeczywisty (lub zbiorowość obiektów powiązanych określonymi zależnościami), ukierunkowanych na minimalizację szkodliwego wpływu na otoczenie. System zagospo-

darowania odpadów jest bezpośrednio związany z elementami generującymi pozostałości, zarówno z procesów przemysłowych jak i konsumpcyjnych.

W rzeczywistości pewne grupy procesów, przede wszystkim przemysłowych, ale również i konsumpcyjnych, wymuszają parametry stanów systemu zagospodarowania odpadów. Matematyczny opis stanu systemu jest możliwy za pomocą równań o wielu zmiennych. Wówczas każdej zmiennej odpowiada określony w danej chwili stan systemu. Pomocne w takim przypadku jest w pierwszym etapie badania i analizowania systemu zagospodarowania odpadów rozpatrywanie go, jako tzw. *czarnej skrzynki*, metodą opisu *input – output* (*wejście – wyjście*). Rozpatrując system gospodarki odpadami jako czarną skrzynkę, ważne są tylko te właściwości systemu, które określają współzależności z innymi elementami należącymi do tzw. otoczenia systemu. Przy opisie metodą *wejście – wyjście*, obiekty należące do systemu dzielone są na:

- obiekty wejścia stanowiące jego bodźce do działania,
- obiekty wyjścia stanowiące reakcję systemu na bodźce.

Definiowany system zagospodarowania generowanych odpadów rozpatrywany jako ciąg powiązanych sekwencyjnie i logicznie zdarzeń może być określony jako system złożony. Przy względnie dużej ilości elementów wchodzących w skład systemu i/lub względnie wysokim stopniu złożoności relacji zachodzących pomiędzy elementami systemu, bądź całym systemem a otoczeniem, definiowany system można uznać za złożony [3]. Systemy złożone często określane są „wielkimi systemami” [4]. Cechą systemów złożonych jest duża ilość wzajemnie powiązanych i oddziałujących na siebie elementów oraz możliwość wydzielenia tzw. podsystemów. Podział systemu złożonego na szereg podsystemów ułatwia identyfikację oraz charakterystykę parametrów wejściowych oraz wyjściowych [6]. Podsystemy zawierają wydzieloną z całego systemu określoną ilość elementów, spełniającą założoną funkcję celu i mogą być traktowane jako samodzielne systemy (również złożone, gdy spełniają warunek systemu złożonego). Podział taki jest użyteczny przy opracowaniu bilansów i analiz, wszelkich procesów zachodzących w obrębie układu, mających pośredni lub bezpośredni wpływ na podejmowanie decyzji zarządzających. Kwalifikowanie obiektów jako elementów systemu wymaga przeprowadzenia analizy [5]:

- istniejących obiektów – ich aktualnego stanu technicznego,
- warunków eksploatacji urządzeń i obiektów,
- warunków środowiskowych i urbanistycznych,
- zamierzeń rozwojowych – modernizacji, wymiany urządzeń i zastosowania innowacyjnych technologii,
- ewentualnych zakłóceń działania systemu, w wyniku wystąpienia awarii.

Wymienione czynniki ściśle związane są z warunkami naturalnymi i specyfiką regionu. Oznacza to, że każdy zdefiniowany system gospodarki odpadami ma swój indywidualny stan, strukturę i charakterystykę pracy.

4. Kompleksowy system gospodarki odpadami

Implementacja kompleksowego systemu gospodarki odpadami powinna zacząć się od projektu i określenia funkcji celu oraz składowych elementów należących do modelu. Elementarne części systemu – podsystemy wpływają na realizację celu całego układu. Pojedyncze podsystemy zachowywać się mogą jak cały układ, pozostając we wzajemnych relacjach z innymi elementami systemu nadrzędnego. Przy względnie dużej ilości elementów i/lub wysokim stopniu złożoności relacji między elementami całego systemu, pojedyncze podsystemy można rozpatrywać jako odosobnione systemy. W obrębie jednej organizacji w systemie gospodarki odpadami przemysłowymi analiza podsystemów traktowanych jako wydzielone osobne układy doprowadzi do rozdrobnienia procesów zagospodarowania pozostałości na pojedyncze ciągi przepływu produktu (odpadu). Należy zaznaczyć, że to co w obrębie jednego przedsiębiorstwa jest odpadem, zgodnie z definicją odpadów nieprzydatności i nieużyteczności w miejscu i/lub czasie, będzie dla innej jednostki organizacyjnej pełnowartościowym produktem. Oprócz zaprojektowania całej struktury kompleksowego systemu gospodarki odpadami ważne jest określenie strumieni ich przepływu pomiędzy „wieloma” przedsiębiorstwami. Ilość strumieni wyjściowych dla odpadów w przypadku jednego przedsiębiorstwa uzależniona jest od ilości generowanych różnego rodzaju pozostałości oraz od wielkości produkcji zarówno tego rozpatrywanego przedsiębiorstwa, jak i jego partnerów będących odbiorcami wytwarzanych odpadów. Im większa produkcja, tym więcej odpadów oraz większe zapotrzebowanie na materiały wejściowe, którymi mogą być odpady z innego przedsiębiorstwa.

Skomplikowany i złożony charakter systemu gospodarki odpadami wymaga usystematyzowania go według ściśle ustalonych kryteriów hierarchii. Podejście systemowe polegające na dokonywaniu stopniowej dekompozycji systemu złożonego na szereg podsystemów, i kolejnym rozpatrywaniu wydzielonego podsystemu jako osobnego systemu, umożliwi wydzielenie pojedynczych układów realizujących założoną funkcję celu. Dekompozycji można dokonywać aż do momentu „ostatecznego” tj. do chwili, w której kolejny poziom rozdrobnienia na mniejsze układy w ujęciu ochrony środowiska jest nie przydatny, niecelowy, nieprzynoszący efektów ekologicznych i zbyt kosztowny. Rachunek nakładów finansowych i zysków powinien rozpatrywany być z poziomu systemu nadrzędnego.

5. Dekompozycja systemów gospodarki odpadami

Proces wydzielenia pojedynczych strumieni przepływu generowanych odpadów o charakterystycznych parametrach stanowi fundament do stworzenia kompleksowego systemu zagospodarowania wszystkich istniejących oraz wytwarzanych pozostałości. Każdy wydzielony strumień przepływu pojedynczego odpadu może w ujęciu wycinkowym stanowić odosobniony system (układ), jednak w ujęciu kompleksowym będzie on podsystemem

większego systemu, tj. jego współzależnym składowym elementem. W procesach przemysłowych przy produkcji seryjnej wydzielenie jednorodnych potoków wytwarzanych odpadów jest mniej skomplikowane niż w przypadku produkcji wyrobów jednostkowych. Wydzielone strumienie odpadów z pojedynczych ciągów procesów produkcyjnych charakteryzują się jednorodnym składem, a ich właściwości nie wykazują wahań fizykochemicznych. Działania takie prowadzą do rozdrobnienia na elementarne potoki całych procesów technologicznych.

Klasyfikacja wytwarzanych odpadów uzależniona jest od wielu czynników. Najczęściej stosowanymi podziałami generowanych odpadów są:

- klasyfikacja ze względu na stopień obciążenia środowiska;
 - odpady obojętne,
 - odpady niebezpieczne,
- klasyfikacja ze względu na właściwości fizykochemiczne;
 - odpady stałe,
 - odpady ciekłe,
 - odpady gazowe,
- klasyfikacja ze względu na miejsce wytworzenia;
 - odpady przemysłowe,
 - odpady komunalne,
- klasyfikacja ze względu na sposób zagospodarowania;
 - odpady przeznaczone do odzysku,
 - odpady przeznaczone do unieszkodliwienia,
 - odpady przeznaczone do składowania.

W systemach gospodarczych w ujęciu logistycznym, każda z wyżej mienionych klasyfikacji stanowi odrębny strumień przepływu odpadu. Na podstawie kryteriów klasyfikacyjnych tworzymy hierarchiczną strukturę przepływów generowanych pozostałości otrzymując układ (model, system) określający sposób zagospodarowywania wytwarzanych odpadów. Złożoność tego układu uzależniona będzie od stopnia i ilości dokonanych podziałów. Celem wydzielenia pojedynczych strumieni przepływu odpadów jest stworzenie projektów optymalnych działań w zakresie pełnego wykorzystania powstających pozostałości.

W celu stworzenia w miarę jednolitych sposobów zagospodarowania odpadów nie wykazujących cech odpadów komunalnych, należy w pierwszej kolejności dokonać klasyfikacji na gałąź przemysłową, w jakiej zostały one „wyprodukowane”. Zaprezentowaną wcześniej klasyfikację odpadów (w przypadku odpadów przemysłowych) należy uzupełnić o kryterium branżowe, do którego się zalicza:

- przemysł wydobywczy (górnictwo),
- przemysł przetwórczy;
 - przedsiębiorstwa paliwowo-energetyczne,
 - przedsiębiorstwa metalurgiczne (hutnictwo żelaza i metali nieżelaznych),

- przedsiębiorstwa elektromaszynowe,
- przedsiębiorstwa chemiczne,
- przedsiębiorstwa mineralne,
- przedsiębiorstwa przemysłu lekkiego,
- przedsiębiorstwa branży spożywczej,
- przedsiębiorstwa drzewno-papiernicze.

Zgodnie z teorią systemów złożonych, podział systemu na szereg podsystemów ułatwia identyfikację parametrów całego (dużego) układu. Strukturę całościowego systemu gospodarki odpadami przemysłowymi można ująć następująco:

$$S_1 = \langle S_{2'}, S_{2''}, R_1 \rangle \quad (1)$$

gdzie:

S_1 – zbiór elementów należących do systemu gospodarki odpadami przemysłowymi

$S_{2'}$ – podsystem gospodarki odpadami przemysłu wydobywczego

$S_{2''}$ – podsystem gospodarki odpadami przemysłu przetwórczego

R_1 – relacje zachodzące między elementami systemu S_1

$$S_{2''} = \langle P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8', P_8'', R_{2''} \rangle \quad (2)$$

gdzie:

$S_{2''}$ – podsystem gospodarki odpadami przemysłu przetwórczego, który w kolejnej dekompozycji traktowany jest jak odosobniony system gospodarki odpadami przemysłu przetwórczego o charakterystycznych parametrach wejściowych i wyjściowych,

P_1 – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora paliwowo-energetycznego

P_2 – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora drzewno-papierniczego

P_3 – podsystem gospodarki odpadami sektora przemysłu lekkiego

P_4 – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora elektromaszynowego

P_5 – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora chemicznego

P_6 – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora mineralnego

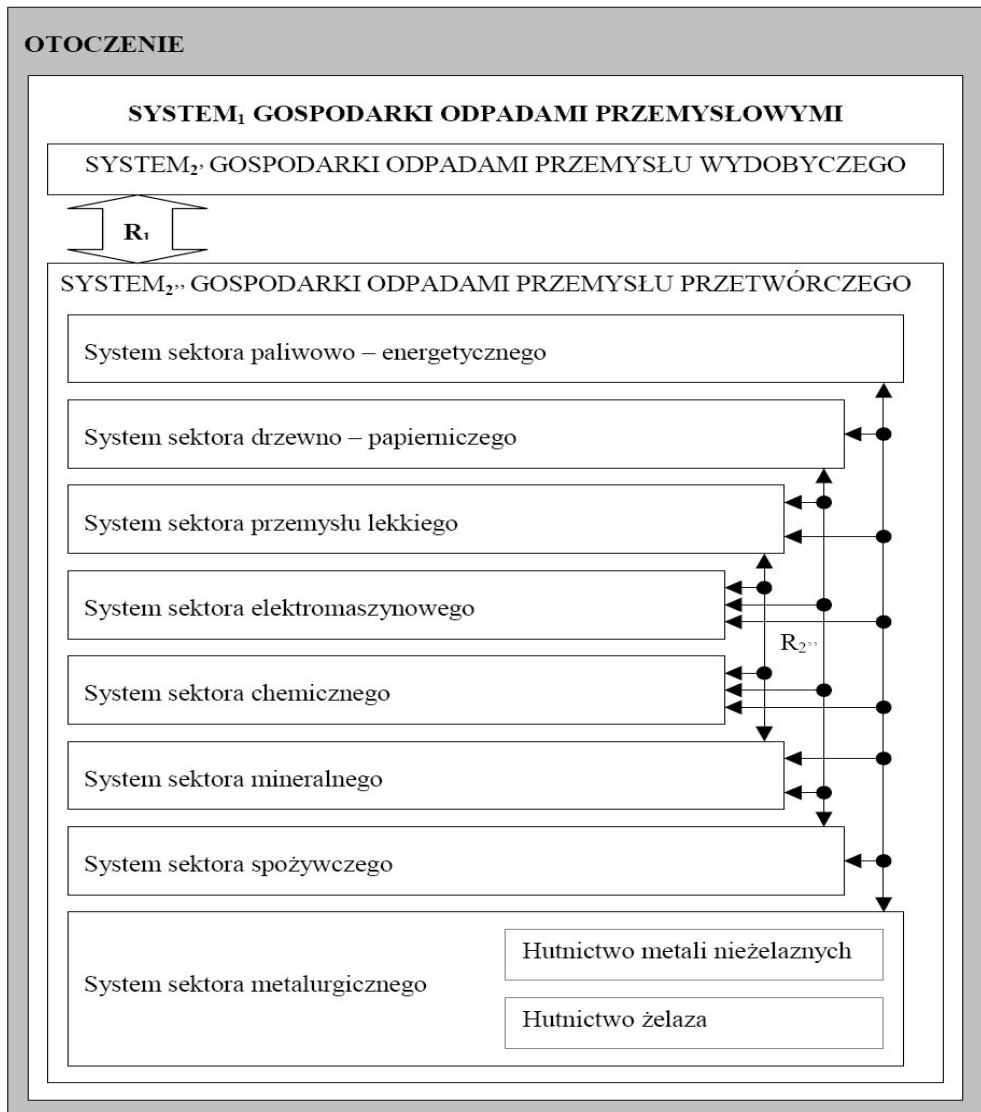
P_7 – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora spożywczego

P_8' – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora metali nieżelaznych

P_8'' – podsystem gospodarki odpadami przemysłowymi sektora hutnictwa żelaza i stali

$R_{2''}$ – relacje zachodzące między elementami systemu $S_{2''}$.

Na rysunku 2 przedstawiony jest schemat gospodarki odpadami przemysłowymi z uwzględnieniem podziału na branże przemysłowe.



Rys. 2. Uproszczony schemat systemu gospodarki odpadami przemysłowymi

Kompleksowy system gospodarki odpadami jest układem wieloelementowym tworzącym pewną złożoną całość. Zdefiniowanie i określenie struktury systemu recykulacji odpadów i ustalenie występujących relacji między elementami pozwala na określenie optymalnego modelu pracy. System gospodarki odpadami w ujęciu kompleksowym w celach pełnego zagospodarowania pozostałości powinien uwzględniać wszystkie procesy przetwórcze w różnych gałęziach przemysłowych [7]. Zadania związane z usuwaniem odpadów

przemysłowych i komunalnych, zgodnie z przyjętymi normami i standardami obsługi, mają charakter bezwzględnych ograniczeń, co do ilości strumieni odpadów kierowanych na składowiska. Istotne znaczenie na pracę systemu mają wpływ nowoczesne rozwiązania techniczno-technologiczne zaimplementowane w strukturach organizacyjnych przedsiębiorstw.

6. Podsumowanie

Wymienione w artykule kryteria klasyfikacyjne strumieni generowanych pozostałości mogą być pomocne w utworzeniu kolejności podziału na szereg współzależnych układów kompleksowego systemu zagospodarowania odpadów. Kompleksowe, całościowe zagospodarowanie wytwarzanych odpadów nie zostało wdrożone w żadnym z sektorów gospodarczych ani pojedynczych jednostkach gospodarczych. Najczęściej zagospodarowywane są tylko te odpady, z których można uzyskać korzyści ekonomiczne.

W gospodarce obok siebie funkcjonują powiązane ze sobą różnymi zależnościami przedsiębiorstwa (prywatne, publiczne), osoby fizyczne, organy i instytucje administracyjne (publiczne, społeczne). Działania wymienionych podmiotów mogą powodować powstawanie podwyższonych kosztów środowiskowych u innych, bez konieczności wypłacania dodatkowych odszkodowań bądź kompensat. Projektowanie i modelowanie kompleksowego systemu gospodarki odpadami powinno polegać na agregacji pojedynczych strumieni przepływu odpadów powstających w obrębie jednej organizacji ewentualnie kilku, jeśli posiadają one większość cech wspólnych dotyczących struktury generowania odpadów. Tak wydzielony jednorodny rodzaj odpadu może być traktowany jako pełnowartościowy surowiec wtórny. Rozpatrywanie produktu logistycznego, którym jest jednorodny, co do rodzaju odpad, umożliwi użycie sprawdzonych praktyk z obszaru logistyki do optymalizacji procesów zagospodarowania, strumieni przepływów i kosztów związanymi z generowanymi pozostałościami.

Opracowanie kompleksowego systemu gospodarki odpadami, który w pełni będzie zagospodarowywał generowane odpady, obejmuje dwuetapowe działania:

- opracowanie koncepcji podsystemów ich składowych ogniw, o indywidualnej dla każdego z nich strukturze i charakterystycznych cechach,
- analizę wariantów skuteczności działania systemu gospodarki odpadami jako całości z określeniem efektywnego wykorzystania pozostałości.

Powyższe działania prowadzą do traktowania procesów w obrębie systemu gospodarki odpadami jako projektów planowania taktycznego i strategicznego w długim okresie czasu.

Literatura

- [1] Korzeń Z., *Ekologistyka*. Biblioteka Logistyka, Poznań 2001.
- [2] Klir G.J., *Ogólna teoria systemów*. WNT, Warszawa 1979.

- [3] Buslenko N.P., Kałasznikow W.W., Kowalenko I.N., *Teoria systemów złożonych*. PWN, Warszawa 1979.
- [4] Jodłowski W., Karwat B., Michłowicz E., *Analiza czynników determinujących zmiany struktury wielkich systemów na przykładzie hutnictwa stali*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Problemy utylizacji odpadów w hutnictwie żelaza i stali”, Wyd. PiT 2000.
- [5] Bilitewski B., Hardtle G., Marek K., *Podręcznik gospodarki odpadami*. Wydawnictwo „Seidel – Przywecki”, Warszawa 2003.
- [6] Karwat B., *Recykling odpadów poprodukcyjnych w hucie surowcowej stali*. Hutnik Wiadomości Hutnicze, nr 10, Warszawa 2010.
- [7] Zwolińska B., Kisiel P., *Systemowe ujęcie zagospodarowywania wytwarzanych odpadów*. Logistyka, nr 6/2010.