

Wojciech Hryb

## Ocena skuteczności działania sortowni na podstawie bilansu odpadów komunalnych

System gospodarki odpadami w Polsce jest obecnie rozbudowywany i modernizowany w celu dostosowania do standardów Unii Europejskiej. Przepisy prawne dotyczące gospodarki odpadami i ochrony środowiska zostały już dostosowane do dyrektywy UE, natomiast do najpilniejszych zadań należą rozwój selektywnej zbiórki odpadów komunalnych, budowa nowoczesnych sortowni i kompostowni, a także zakładów fermentacji oraz termicznego przekształcania odpadów komunalnych, zalecanych w regionach o liczbie mieszkańców powyżej 300 tysięcy.

Instalacje i urządzenia do sortowania odgrywają istotną rolę w systemie gospodarki odpadami i są jej nieodzownym składnikiem. Konieczne jest jednak takie zwiększenie ich skuteczności, aby na składowiska trafiały jedynie nieznaczne ilości odpadów obojętnych czy kłopotliwych w wykorzystaniu. Liczba instalacji sortowania odpadów jest niewystarczająca w stosunku do zapotrzebowania. Nowoczesne zakłady mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych, obejmujące sortownie, kompostownie (tlenowa stabilizacja) lub biogazownie i linie technologiczne wytwarzania paliw z odpadów, pozwolą na osiągnięcie wymaganych przepisami prawa poziomów recyklingu i odzysku odpadów, jak i ograniczą masę frakcji biodegradowalnej kierowanej na składowisko.

W styczniu 2014 r. status Regionalnych Instalacji Przetwarzania Odpadów Komunalnych (RIPOK) miało w Polsce 268 instalacji, w tym 96 instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych oraz 72 instalacje kompostowania zebranych selektywnie odpadów zielonych i innych bioodpadów. Status zastępczych instalacji do obsługi regionów gospodarki odpadami komunalnymi (do czasu uruchomienia RIPOK) miały 704 instalacje, w tym 213 instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych, a także 150 kompostowni do przetwarzania zebranych selektywnie odpadów zielonych i innych bioodpadów [1].

Instalacje sortowania zmieszanych odpadów komunalnych powstałe przed wieloma laty wymagają modernizacji, aby zwiększyć sprawność wydzielenia surowców wtórnych do recyklingu, a z pozostałości po ich wydzieleniu pozyskać paliwo alternatywne. Konieczne jest także takie doposażenie linii technologicznych w urządzenia pozwalające na doczyszczanie frakcji organicznej wydzielonej z odpadów komunalnych czy stabilizatu uzyskanego po procesie stabilizacji tlenowej, aby wykorzystać go w procesach rekultywacji.

Skuteczność pracy sortowni ocenia się na podstawie testów polegających na określeniu masy odpadów sortowanych w zakładzie w danym czasie. Takie testy należy wykonywać w różnych porach roku, aby uchwycić zmienność składu morfologicznego odpadów komunalnych i jego wpływ na ilość pozyskiwanych z instalacji surowców wtórnych i paliw alternatywnych. Dzięki temu można określić masę pozyskiwanych z odpadów komunalnych surowców wtórnych, paliwa alternatywnego, frakcji organicznej, mineralnej i pozostałości po sortowaniu trafiających na składowisko. Pozwoli to na wyznaczenie masowego wskaźnika wykorzystania odpadów w danej instalacji. Dodatkowo ręcznie wydziela się z pozostałości po sortowaniu te surowce wtórne, które powinny być odseparowane wcześniej, ale z powodu niedoskonałości systemu nie zostały wydzielone. Pozwala to wyznaczyć wskaźniki sortowalności określonych frakcji w poszczególnych typach urządzeń. Tego typu testy pozwalają na porównanie sprawności rozwiązań technologicznych i na ich podstawie można np. podjąć decyzję o sposobie modernizacji danego zakładu i doborze optymalnych rozwiązań w nowo budowanych sortowniach odpadów.

Sortery optopneumatyczne zastosowane w sortowniach w Gorzowie Wielkopolskim i Bielsku-Białej wykorzystują nowoczesne technologie identyfikacji rodzaju materiałów lub ich kolorów, które stosowane są w przypadku odpadów komunalnych, ale także surowców mineralnych, recyklingu szkła, drewna, poszczególnych rodzajów tworzyw sztucznych czy innych materiałów [2–7]. W literaturze dostępne są dane dotyczące analizy przepływu masy odpadów w procesie produkcji paliw alternatywnych [8], zakładów mechaniczno-biologicznego przetwarzania [9], jak również planowania gospodarki odpadami [10]. W pracach [11–14] podkreślono potrzebę uwzględnienia wyników analizy cyklu życia w planowaniu i wyborze najlepszego rozwiązania gospodarki odpadami. Porównanie sprawności różnych rozwiązań linii technologicznych do produkcji paliw alternatywnych z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych przedstawiono w pracach [15–17].

### Regulacje prawne

Zapisy dyrektyw Unii Europejskiej, wdrożone do polskiego prawa, znalazły odzwierciedlenie między innymi w ustawie o odpadach, ustawie o utrzymaniu czystości i porządku w gminach czy w krajowym planie gospodarki odpadami. Do najważniejszych zadań w zakresie gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce w najbliższych latach można zaliczyć:

Dr inż. W. Hryb: Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, ul. S. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, [wojciech.hryb@polsl.pl](mailto:wojciech.hryb@polsl.pl)

– ograniczenie masy biodegradowalnej frakcji odpadów kierowanej na składowiska; dopuszczalna ilość składowanych odpadów biodegradowalnych w 2020 r. ma wynieść 35% ilości tej frakcji wytworzonej w 1995 r.,

– zwiększenie stopnia recyklingu oraz ilości odzyskanych wybranych frakcji odpadów komunalnych; osiągnięcie w 2020 r. 50% poziomu recyklingu i przygotowania do ponownego użycia frakcji papieru, tworzyw sztucznych, szkła i metalu,

– modernizacja istniejących i budowa nowych zakładów mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych.

Szczegółowe zapisy dotyczące tych zadań regulują następujące rozporządzenia (stan prawny na kwiecień 2015 r.):

– rozporządzenie Ministra Środowiska z 25 maja 2012 r. w sprawie poziomów ograniczenia masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji przekazywanych do składowania oraz sposobu obliczania poziomu ograniczania masy tych odpadów [18], będące aktem wykonawczym do ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach [19],

– rozporządzenie Ministra Środowiska z 29 maja 2012 r. w sprawie poziomów recyklingu, przygotowania do ponownego użycia i odzysku innymi metodami niektórych frakcji odpadów komunalnych [20], będące również aktem wykonawczym do tej samej ustawy [19],

– rozporządzenie Ministra Środowiska z 11 września 2012 r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych [21], będące aktem wykonawczym do ustawy o odpadach [22].

Wysokie wymagania dotyczące skuteczności zakładów mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów stawia rozporządzenie Ministra Gospodarki z 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu [23], zgodnie z którym od 1 stycznia 2016 r. nie będzie możliwe składowanie odpadów o kodzie 19 12 12 (odpady z mechanicznej obróbki odpadów), które spełniają następujące warunki:

– zawartość ogólnego węgla organicznego w suchej masie powyżej 5%,

– strata prażenia powyżej 8%,

– ciepło spalania (odniesione do suchej masy) powyżej 6 MJ/kg.

Większość polskich sortowni nie spełnia tych restrykcyjnych wymagań, co potwierdziły badania zarówno frakcji podsitowej (o granulacji 0÷40 mm), jak i pozostałości po sortowaniu pochodzących z typowej sortowni [24]. Kaloryczność pozostałości po sortowaniu z większości polskich sortowni, a szczególnie tych, w których pozostałość po wydzieleniu surowców wtórnych nie jest wykorzystywana do wytwarzania paliwa z odpadów, przekracza wartości graniczne określone w rozporządzeniu [23]. Kolejną frakcją problematyczną w świetle tego rozporządzenia jest tzw. frakcja mineralna wydzielana z odpadów komunalnych w przesiewaczu bębnowym, najczęściej z wykorzystaniem sit z otworami o średnicy 20 mm, 25 mm lub 40 mm – zawiera ona znaczny udział frakcji organicznej (głównie odpady kuchenne), zwiększający się wraz ze wzrostem rozmiaru otworów w sitach. W przypadku stosowania sita z otworami o średnicy >20 mm frakcja ta będzie przekraczać wartości przyjęte w rozporządzeniu [23], odnoszące się do ogólnego węgla organicznego i straty prażenia. W rozporządzeniu [21] znajduje się zapis, że „w procesie mechanicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych wydziela się frakcję o wielkości

co najmniej 0÷80 mm ulegającą biodegradacji oznaczoną kodem 19 12 12, wymagającą zastosowania procesów biologicznego przetwarzania, przez które rozumie się procesy prowadzone w warunkach tlenowych lub beztlenowych z udziałem mikroorganizmów, w wyniku których następują zmiany właściwości fizycznych, chemicznych lub biologicznych odpadów”. Zapis ten narzuca stosowanie w przesiewaczu sit tylko o otworach 80 mm, bez zastosowania wcześniej np. sita z otworami 20 mm.

Obecnie przygotowany jest projekt nowego rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych (projekt z 12 sierpnia 2014 r.), który prawdopodobnie wejdzie w życie w 2016 r. Zgodnie z nim rozładowywanie odpadów ma się odbywać w obiekcie zamkniętym wyposażonym w szczelną posadzkę zapobiegającą przedostawaniu się odcieków do środowiska i niezbędną instalację wentylacyjną do oczyszczania gazów. W projekcie tym nie wszystkie zapisy prowadzą do ujednoczenia i uproszczenia zasad przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych. Nie przewiduje on wydzielenia frakcji 0÷20 mm w sezonie grzewczym, która na terenach, gdzie w kotłach gospodarstw domowych stosowany jest węgiel kamienny zawiera w przeważającej części popiół. Kierowanie dużych ilości popiołu ze spalania węgla kamiennego (pH wyciągu ma wartość około 12) do biologicznego przetwarzania odpadów uniemożliwi właściwy przebieg tego procesu oraz będzie powodować szybkie zużycie elementów mechanicznych linii technologicznej (mieszadła i podajniki ślimakowe w przypadku procesu fermentacji metanowej, przerzucarki w przypadku stabilizacji tlenowej), a ponadto zatykanie otworów w posadzce, którymi odbierane są odcieki i zasysane jest powietrze. Ograniczone zostały także możliwości wykorzystania uzyskanego stabilizatu po przesianiu jedynie do wykorzystania na składowisku jako odpad o kodzie ex 19 05 99, co uniemożliwia odzyskanie tej frakcji poprzez wykorzystanie jej w trakcie eksploatacji na okrywę biologiczną czy też na potrzeby rekultywacji terenów zdegradowanych. Projekt doprecyzowuje także rodzaje odpadów, które mogą powstawać w procesie biologicznego suszenia, którego głównym celem jest pozyskanie odpadów palnych możliwych do wykorzystania w procesie odzyskiwania (R1) czy unieszkodliwiania (D10), pod warunkiem spełnienia wymagań odbiorców.

Obowiązujące w Polsce przepisy kładą główny nacisk na zwiększenie stopnia recyklingu i skuteczności odzyskiwania frakcji znajdujących się w odpadach komunalnych, ograniczenie masy frakcji organicznej kierowanej na składowiska i zmniejszenie kaloryczności pozostałości po sortowaniu. Aby zrealizować te wymagania należy budować nowoczesne sortownie odpadów oraz zwiększać sprawność obecnych instalacji przez ich modernizację. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki testów określających sprawność działania dwóch wybranych sortowni odpadów, które pozwalają ocenić skuteczność różnych rozwiązań (całych linii technologicznych czy konkretnych urządzeń).

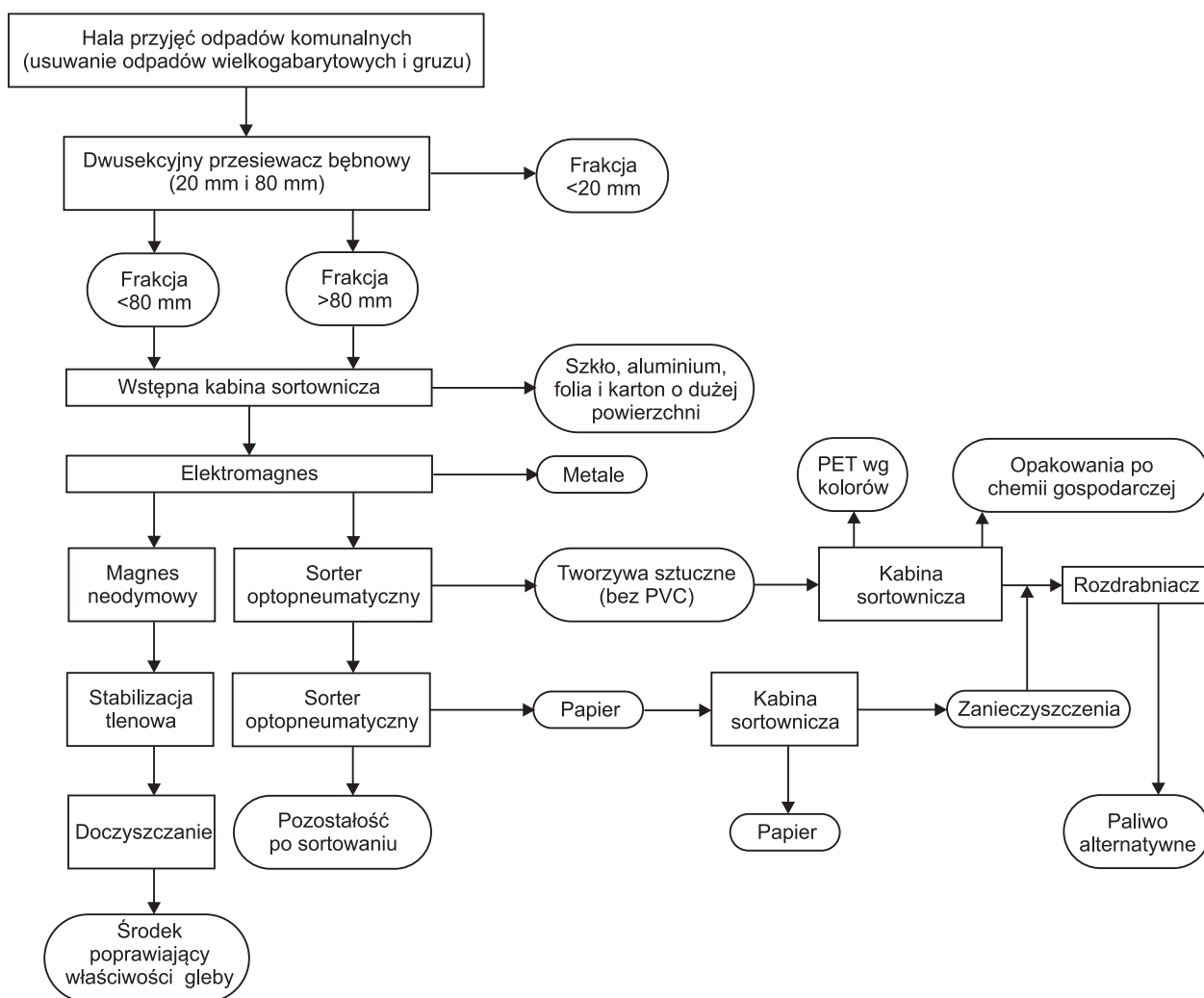
### Zakład Utylizacji Odpadów w Gorzowie Wielkopolskim

Zakład Utylizacji Odpadów spółka z o.o. w Gorzowie Wielkopolskim został zmodernizowany w 2011 r. przez doposażenie instalacji w linię produkcji paliwa alternatywnego i zamontowanie dwóch separatorów optopneumatycznych, co zwiększyło sprawność wydzielenia surowców wtórnych i wydajność linii technologicznej do 60 tys. t/a [25].

### Sposób prowadzenia badań

Test skuteczności pracy instalacji do sortowania odpadów w Gorzowie Wielkopolskim (rys. 1) przeprowadzono 19 października 2011 r. (wspólnie z przedstawicielami firm Sutco i Titech). Odpady komunalne były wyładowywane przed halą zakładu w miejscu niezadaszonym, co w przypadku intensywnych opadów atmosferycznych powodowało zawilgocenie znajdujących się w nich surowców wtórnych i frakcji palnych wchodzących w skład paliwa alternatywnego. Następnie odpady ładownicą transportowano do hali, gdzie były podawane do przenośnika bunkrowego. Przed podaniem ich do leja zasypowego wybierano z nich ręcznie odpady niebezpieczne, wielkogabarytowe, gruz oraz folie i kartony o dużej powierzchni. Następnie przenośnikiem wznoszącym odpady trafiały do dwusekcyjnego przesiewacza bębnowego z otworami o średnicach 20 mm i 80 mm. Pierwszy przesiew stanowiła frakcja o wymiarach 0÷20 mm. Kolejna frakcja o wymiarach 20÷80 mm, po przejściu przez wstępną kabinę sortowniczą (wydzielanie puszek aluminiowych i innych zanieczyszczeń) i strefę działania elektromagnesu, a później magnesu neodymowego (wydzielanie baterii z obudową żelazną), była kierowana do procesu stabilizacji tlenowej. Następnie stabilizat był doczyszczany mechanicznie tak, aby uzyskać polepszacz gleby. Frakcja nadsitowa (>80 mm) z przesiewacza bębnowego trafiała do wstępnej kabiny sortowniczej, gdzie wydzielono

folie, kartony o dużej powierzchni oraz aluminium i szkło. Następnie frakcja ta przechodziła przez strefę działania separatora elektromagnetycznego i trafiała na przenośnik przyspieszający, gdzie odpady z tworzyw sztucznych były identyfikowane przez pierwszy separator optopneumatyczny. W dniu badań separator ten miał za zadanie wydzielić z odpadów wszystkie tworzywa sztuczne z pominięciem PVC. Wydzielona strumieniem sprężonego powietrza frakcja tworzyw sztucznych trafiała na przenośnik sortowniczy w głównej kabine sortowniczej, gdzie ręcznie była wydzielana frakcja PET i opakowania po chemii gospodarczej. Pozostałą mieszaninę tworzyw sztucznych transportowano przenośnikami do urządzenia rozdrabniającego, do którego odrębnym przenośnikiem kierowane były także wybrane rodzaje odpadów przemysłowych. Frakcje palne odpadów, po rozdrobnieniu do wymiarów <40 mm, stanowiły paliwo alternatywne, którego jakość była kontrolowana w laboratorium zakładu. Główny strumień odpadów po przejściu przez strefę działania pierwszego separatora optopneumatycznego trafiał do strefy działania drugiego separatora optopneumatycznego, który identyfikował i wydelał frakcję papieru. Następnie frakcja ta trafiała na przenośnik sortowniczy w głównej kabine sortowniczej, gdzie pracownicy ręcznie wydzielali z niej zanieczyszczenia. Wydzielone surowce wtórne trafiały do boksów, skąd okresowo były kierowane do urządzenia belującego.



Rys. 1. Schemat technologii sortowania i przetwarzania odpadów w Zakładzie Utylizacji Odpadów sp. z o.o. w Gorzowie Wielkopolskim  
Fig. 1. Technological scheme of waste sorting and processing in Waste Utilization Plant Ltd. in Gorzow Wielkopolski

## Wyniki badań

Wyniki testu skuteczności pracy instalacji do sortowania odpadów przedstawiono w tabeli 1. Przepustowość analizowanej instalacji wynosiła 17 t/h, a czas pracy linii technologicznej – 250 min.

Skuteczność wydzielania danej frakcji odpadów (wskaźnik odzyskania) wyznaczono z zależności:

$$E = [M_s / (M_s + M_p)] 100 \quad (1)$$

w której:

E – skuteczność wydzielenia danej frakcji, %

$M_s$  – masa frakcji wydzielona w sortowni, kg

$M_p$  – masa frakcji w pozostałości po sortowaniu, kg

Obliczona w ten sposób skuteczność wydzielania opakowań typu PET w analizowanej sortowni wynosiła 85%, a papieru 91%.

Na podstawie zebranych danych możliwe było także wyznaczenie wartości masowego wskaźnika wykorzystania odpadów, obliczonego jako zdolność do maksymalnego przetworzenia odpadów w użyteczne surowce i produkty, ograniczając tym samym strumień odpadów kierowanych na składowisko. Wskaźnik ten jest głównym wyznacznikiem skuteczności pracy zakładu zagospodarowania

odpadów, a jego wartość oblicza się z następującej zależności [26]:

$$W_m = (X_{1-n} / X_p) 100 \quad (2)$$

w której:

$W_m$  – masowy wskaźnik wykorzystania odpadów, %

$X_p$  – masa odpadów, t

$X_{1-n}$  – masa surowców przeznaczonych do wykorzystania energetycznego, materiałowego, biologicznego (uwzględniająca masę zanieczyszczeń znajdujących się w poszczególnych frakcjach, surowcach i uzyskanych produktach), t

Przy założeniu, że udział zanieczyszczeń nie dyskwalifikuje możliwości ich dalszego wykorzystania, został spełniony warunek zbytu frakcji, tzn.  $X_z \leq X_{gr}$  ( $X_z$  – masa zanieczyszczeń we frakcji X,  $X_{gr}$  – maksymalny udział zanieczyszczeń w danej frakcji, pozwalający na jej wykorzystanie). Wartość wyznacznika skuteczności pracy sortowni ( $W_m$ ) w Gorzowie Wielkopolskim przy założeniu, że stabilizat otrzymany z frakcji podsitowej będzie się nadawał do odzyskania (np. procesie R10) oraz że  $X_p = 70,7$  t, a  $X_{1-n} = 12,99$  t (surowce wtórne i paliwo alternatywne) + 34,21 t (frakcja 20÷80 mm do tlenowej stabilizacji) + 2,8 t (frakcja 0÷20 mm do utwardzania tymczasowych dróg na składowisku) – łącznie 50 t, wynosiła 70,7%.

Tabela 1. Charakterystyka frakcji odpadów otrzymanych w sortowni w Gorzowie Wielkopolskim  
Table 1. Fraction characteristics for wastes obtained in the sorting plant in Gorzow Wielkopolski

Frakcja	Sposób sortowania	Liczba pracowników	Wydajność kg/(h·os.)	Strumień odpadów, t/h	Masa odpadów, t	Udział frakcji, %
PET (mieszanka kolorów)	separator optopneumatyczny (1) – tworzywa sztuczne*, później ręcznie PET w kabinie głównej	2	69,4	0,14	0,58	0,8
PE-HD	separator optopneumatyczny (1) – tworzywa sztuczne*, później ręcznie PE-HD w kabinie głównej	0,9	40,0	0,04	0,15	0,2
Złom żelaza	elektromagnes	0	–	0,18	0,74	1,0
Złom aluminium	ręcznie w kabinie wstępnej	0,1	14,4	0,00	0,01	0,0
	ręcznie w kabinie głównej	0,1	60,0	0,01	0,03	0,0
Papier	separator optopneumatyczny	0	–	0,54	2,24	3,2
Karton	ręcznie w kabinie wstępnej	1	100,0	0,10	0,40	0,6
Karton o dużej powierzchni	ręcznie przy leju zasypowym	0,3	160,0	0,05	0,20	0,3
Folia mieszana	separator optopneumatyczny (1) – tworzywa sztuczne*, później ręcznie folia w kabinie głównej	2	52,7	0,11	0,44	0,6
Folia mieszana o dużej powierzchni	ręcznie przy leju zasypowym	0,3	48,0	0,01	0,06	0,1
Szkło	ręcznie w kabinie wstępnej	0,9	160,0	0,14	0,60	0,8
PET w pozostałości po sortowaniu	ręcznie z pozostałości po sortowaniu	0,5	47,0	0,02	0,10	0,1
Papier w pozostałości po sortowaniu		2	26,4	0,05	0,22	0,3
Aluminium w pozostałości po sortowaniu		0,5	20,2	0,01	0,04	0,1
Paliwo z odpadów (RDF)	separator optopneumatyczny	0	–	1,81	7,54	10,7
Odpady gabarytowe i gruz	ręcznie przy leju zasypowym	0,4	640,0	0,19	0,80	1,1
	ręcznie w kabinie wstępnej	1	619,2	0,62	2,58	3,6
Frakcja 0÷20 mm	Przesiewacz bębnowy	0	–	0,67	2,80	4,0
Frakcja 20÷80 mm				8,21	34,21	48,4
Pozostałość po sortowaniu				4,07	16,96	24,0
Suma		12		16,97	70,70	100

\*z wyjątkiem PVC



Badania bilansu masy sortowanych odpadów komunalnych w przyjętym wariantcie pracy instalacji pozwoliły na sformułowanie wniosków cząstkowych:

- wydzielona w przesiewaczu bębnowym z otworami o średnicy 80 mm frakcja podsitowa o wymiarach 20÷80 mm stanowiła blisko 50% całej masy odpadów komunalnych,

- skuteczność wydzielenia papieru i PET z frakcji nadsitowej (>80 mm) w przyjętym wariantcie pracy instalacji była wysoka i wynosiła odpowiednio 91% i 85%, co uzyskano dzięki odpowiedniemu przygotowaniu sortowanych odpadów i zastosowaniu separatorów optopneumatycznych,

- skuteczność ręcznego wydzielenia aluminium w kabinach wstępnej i głównej była mało skuteczna i wynosiła 50%; aby poprawić ten wskaźnik można zastąpić sortowanie ręczne procesem mechanicznym z zastosowaniem separatora metali nieżelaznych (tzw. separator wiroprowadowy),

- pozyskiwano paliwo alternatywne spełniające restrykcyjne warunki stawiane przez cementownię, które w przyjętym wariantcie pracy instalacji stanowiło około 11% całej masy odpadów,

- uzyskana w instalacji frakcja szkła wydzielana we wstępnej kabinie sortowniczej stanowiła jedynie 0,8% masy odpadów, czego przyczyną może być umiejscowienie jej za, a nie przed przesiewaczem bębnowym, w którym znaczna część szkła ulegała stłuczeniu i jego część trafiała do frakcji podsitowej, a większe kawałki potłuczonego szkła nie były ręcznie wydzielane,

- pozostałość po sortowaniu stanowiła jedynie 24% masy odpadów komunalnych przetwarzanych w instalacji, co świadczyło o wysokiej skuteczności procesu.

## Zakład Gospodarki Odpadami w Bielsku-Białej

Sortownia odpadów (rys. 2) działająca od 2012 r. w Zakładzie Gospodarki Odpadami SA w Bielsku-Białej jest jednym z najnowocześniejszych tego typu obiektów w Polsce. Jej wydajność (praca dwuzmianowa) wynosi 70 tys. t/a [21].

## Sposób prowadzenia badań

Test skuteczności sortowni prowadzono w czasie rozruchu technologicznego zakładu przez siedem dni (od 10 do 18 kwietnia 2012 r.) w trakcie jednozmianowej pracy linii technologicznej sortującej zmieszane odpady komunalne, lecz nie przeprowadzono szczegółowego badania składu morfologicznego przyjętych odpadów, a jedynie założono ich szacunkowy skład na podstawie danych zebranych na potrzeby realizacji tej inwestycji. Okazało się, że skład morfologiczny dostarczonych odpadów ze względu na porę roku (wczesna wiosna) charakteryzował się wysoką zawartością popiołu, która wpłynęła na ponad 50% zawartość frakcji 0÷80 mm. Istotnym elementem mającym wpływ na wynik testu był wysoki odsetek odpadów gabarytowych, w tym materaców, opon oraz papy i odpadów budowlanych. Frakcja o wymiarach powyżej 80 mm (która zawiera możliwe do odzyskania surowce wtórne) stanowiła około 40%. Zmniejszenie potencjału możliwych do odzyskania surowców wtórnych było spowodowane ich mniejszą zawartością w odpadach komunalnych wprowadzanych na linię sortowniczą niż w okresie letnim. Odpady komunalne dostarczane do hali sortowni były ważone na wadze samochodowej przy wjeździe do zakładu. Wysortowane frakcje po zbelowaniu były ważone na wadze platformowej oraz

wadze samochodowej (frakcja 0÷80 mm, pozostałość po sortowaniu, metale, szkło, tworzywa sztuczne twarde, wydzielone w kabinie segregacji wstępnej). Ważenia tego dokonywano zarówno w dniach, w których dane frakcje były wysegregowane, jak również w dniu po zakończeniu testu. Wyniki wszystkich ważeń zostały zarejestrowane w systemie komputerowym. W celu określenia, ile odpadów o charakterze surowców wtórnych zostanie wysortowanych ze wszystkich odpadów komunalnych skierowanych na linię sortowniczą oraz ile surowców zostanie wysortowanych z frakcji o wymiarach powyżej 80 mm, wykorzystano następujące dane:

- masa odpadów komunalnych, które trafiły na linię sortowniczą: 863,46 t,

- odpady gabarytowe, które zostały wyeliminowane na etapie wstępnego sortowania przed podaniem na linię sortowniczą (nie zostały ujęte w bilansie odzyskanych składników odpadów): 87,41 t,

- masa odpadów, które trafiły na linię sortowniczą (po wydzieleniu odpadów gabarytowych): 776,05 t,

- frakcja o wymiarach 0÷80 mm (tlenowa stabilizacja): 486,6 t,

- frakcja o wymiarach 80÷300 mm zawierająca surowce wtórne i pozostałość po sortowaniu: 285,68 t,

- pozostałość po sortowaniu we frakcji 80÷300 mm: 80,68 t,

- frakcja o wymiarach powyżej 300 mm: 3,77 t,

- frakcja stałych paliw wtórnych (RDF): 81,33 t,

- surowce do recyklingu: 123,67 t,

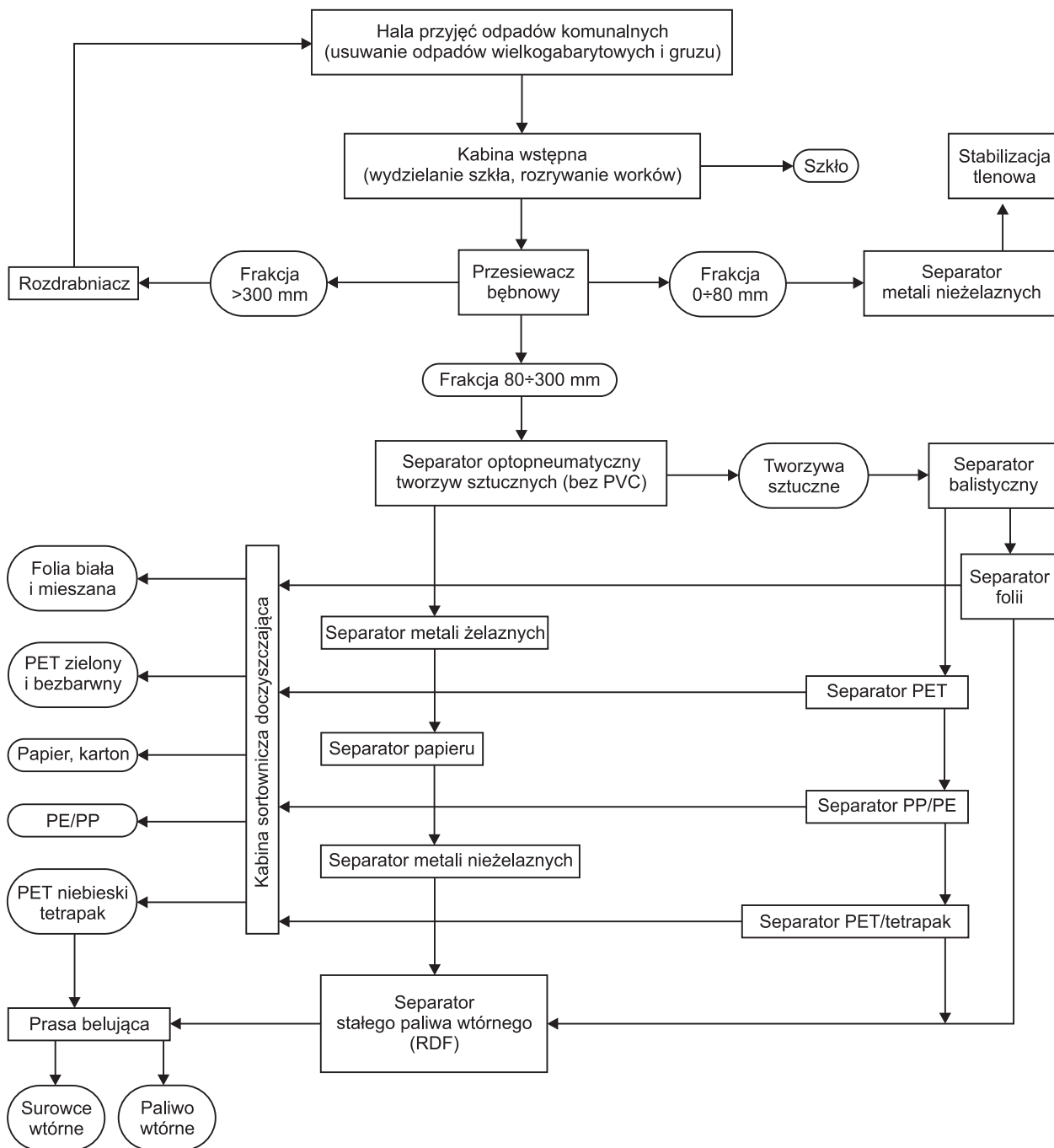
- łącznie surowce do recyklingu i paliwa wtórne: 205 t.

## Wyniki badań

Stopień odzyskania surowców wtórnych (łącznie z frakcją energetyczną), który wyliczono porównując ilość odzyskanych surowców wtórnych i frakcji wysokokalorycznej (205 t) w stosunku do wszystkich odpadów komunalnych (po wydzieleniu tzw. odpadów gabarytowych) (776,05 t), wynosił 26,4%. Z kolei stopień odzyskania surowców wtórnych bez wydzielonej frakcji energetycznej (123,67 t) wynosił prawie 16%. Szczegółową analizę stopnia odzyskania poszczególnych frakcji z masy odpadów zawiera tabela 2.

W celu zbadania skuteczności odzyskiwania surowców wtórnych z ich całkowitej zawartości we frakcji 80÷300 mm przeprowadzono badania ilości surowców wtórnych w pozostałości po przesortowaniu odpadów na linii sortowniczej. Masa reprezentatywnej próbki pobranej z pozostałości po sortowaniu wynosiła 106 kg. Analiza jej składu morfologicznego wykazała, że nieprzydatna do recyklingu frakcja stanowiła 87,26% masy pozostałości po sortowaniu, a surowce wtórne 12,74%. Zawartość poszczególnych surowców wtórnych nadających się do recyklingu znajdujących się w pozostałości po sortowaniu przedstawiono w tabeli 3.

Na podstawie przeprowadzonego testu obliczono udział nieodzyskanych surowców wtórnych zawartych w pozostałości po sortowaniu w stosunku do łącznej ilości odpadów skierowanych na linię sortowniczą, który wynosił 1,32%. Po zsumowaniu ilości surowców wtórnych odzyskanych w separatorach oraz zawartych w pozostałości po sortowaniu otrzymano wynik 27,72%. Stopień odzyskania surowców wtórnych z ich całkowitej ilości we frakcji >80 mm, obliczony jako stosunek ilości surowców wtórnych odzyskanych w instalacji do całkowitej ilości odpadów



Rys. 2. Schemat technologii sortowania i przetwarzania odpadów w Zakładzie Gospodarki Odpadami SA w Bielsku-Białej  
Fig. 2. Technological scheme of waste sorting and processing in Waste Management Plant S.A. in Bielsko-Biala

o charakterze surowców wtórnych zawartych we frakcji  $>80\text{mm}$ , wynosił 95,2%. Wartość masowego wskaźnika wykorzystania odpadów komunalnych ( $W_m$ ), w odniesieniu do całkowitej masy odpadów kierowanych na linię sortowniczą bez wydzielonych przed sortowaniem odpadów gabarytowych i przy założeniu, że uzyskany z frakcji podsitowej stabilizat będzie nadawał się do któregoś z procesów odzyskiwania (np. R10), wynosiła 89%.

Przeprowadzona analiza wykazała wysoką sprawność testowanej linii sortowniczej, o czym świadczyła duża skuteczność wydzielania szerokiego asortymentu surowców wtórnych z całej masy odpadów. Zauważalnym problemem był duża ilość różnych tworzyw (przede wszystkim folii) w pozostałości po sortowaniu, co najprawdopodobniej wynikało z braku rozrywania wszystkich worków

w kabinie wstępnej segregacji lub dużego zanieczyszczenia materiału (wówczas separator nie identyfikował poprawnie danego odpadu). Konieczne jest zatem dbanie o jak największą czystość wprowadzanego surowca, czyli m.in. oddzielenie tzw. odpadów suchych od mokrych. Wówczas na linię sortowniczą trafiałyby wyłącznie odpady suche (mokre kierowane byłyby wówczas bezpośrednio do procesu kompostowania). Takie działanie nie tylko zwiększy stopień odzyskania frakcji zawierających surowce wtórne, ale także zminimalizuje ilość zawartych w nich zanieczyszczeń. Dualny system zbiórki odpadów komunalnych jest promowany przez Zakład Gospodarki Odpadami SA w Bielsku-Białej zarówno wśród władz samorządowych, jak i społeczeństwa. Odzyskane w wyniku zautomatyzowanego procesu sortowania frakcje odpadów po zbelowaniu

Tabela 2. Stopień odzyskania surowców wtórnych w sortowni w Bielsku-Białej

Table 2. Level of secondary raw material recovery in the sorting plant in Bielsko-Biala

Surowiec	Masa t	Stopień odzyskania %	Łączny stopień odzyskania %
Szkoło białe	10,96	1,41	2,07
Szkoło kolorowe	5,12	0,66	
Złom żelaza	15,88	2,05	2,22
Złom metali nieżelaznych	1,31	0,17	
PE	5,90	0,76	5,04
PP	0,47	0,06	
PET bezbarwny	5,61	0,72	
PET niebieski	2,75	0,35	
PET zielony	1,31	0,17	
Folia bezbarwna	0,89	0,11	
Folia mieszana	19,79	2,55	
Tworzywa twarde	2,42	0,31	
Tetrapak	4,77	0,61	
Papier	35,07	4,52	
Karton	11,42	1,47	5,99
Paliwo (RDF)	81,33	10,48	10,48
Suma	205,00	26,42	26,42

Tabela 3. Zawartość surowców wtórnych w próbce pozostałości po sortowaniu (106 kg)

Table 3. Raw material content in the sample of post-sorting waste remains (106 kg)

Surowiec	Masa, kg	Udział, %
PET, PE	2,0	1,89
Tworzywa mieszane	6,0	5,66
Tetrapak	1,0	0,94
Złom żelaza	1,0	0,94
Złom metali nieżelaznych	0,5	0,47
Papier	3,0	2,83
Suma	13,5	12,73

są odsprzedawane, co niewątpliwie korzystnie wpływa na bilans ekonomiczny firmy. Badania wskazały również na dużą ilość frakcji, stanowiącej składnik do produkcji paliwa alternatywnego (ok. 10%). Ze względu na brak możliwości przerobienia na terenie zakładu tej frakcji na paliwo alternatywne, jest ona obecnie przekazywana jako składnik RDF za dopłatą, co podnosi koszty działania przedsiębiorstwa. W tabeli 4 zestawiono bilans masy sortowanych zmieszanych odpadów komunalnych, który obrazuje rzeczywistą skuteczność pracy linii sortowniczej.

Tabela 4. Porównanie skuteczności sortowni odpadów w Gorzowie Wielkopolskim i Bielsku-Białej

Table 4. Effectiveness data comparison for sorting plants in Gorzow Wielkopolski and Bielsko-Biala

Parametr, jednostka	Sortownia	
	Gorzów Wielkopolski	Bielsko-Biala
Wydajność sortowni, tys. t/a	60	70
Automatyzacja sortowania	średnia	duża
Nakłady inwestycyjne	średnie	duże
Odzyskane surowce*, %	7,6	16,0
Odzyskane paliwo*, %	11,0	10,5
Pozostałość po sortowaniu*, %	24,0	10,5

\*udział masowy w odniesieniu do odpadów komunalnych poddanych sortowaniu

## Wnioski

◆ Przeprowadzone testy skuteczności pracy sortowni w Gorzowie Wielkopolskim i Bielsku-Białej w odniesieniu do niesegregowanych odpadów komunalnych wykazały wysoką sprawność procesów prowadzonych w obu zakładach, o czym świadczy wartość wskaźnika wykorzystania odpadów wynosząca odpowiednio około 70% i około 90%.

◆ Sortownia odpadów w Bielsku-Białej charakteryzowała się większą ilością wydzielanych surowców wtórnych, co wynikało z lepszego umaszynowania procesu sortowania (sześć separatorów optopneumatycznych, separator balistyczny, separator metali nieżelaznych) oraz szerszego asortymentu wydzielanych frakcji. Dzięki umiejscowieniu kabiny wstępnej przed przesiewaczem bębnowym (który powoduje tłuczenie szkła) uzyskano większy stopień odzyskania szkła. Jednak mankamentem instalacji w Bielsku-Białej jest brak rozdrabniacza frakcji wysokoenergetycznej wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych oraz instalacji doczyszczania stabilizatu wytworzonego z frakcji organicznej wydzielonej, co utrudnia realizację procesu odzyskiwania surowców wtórnych.

◆ Sortery optopneumatyczne zastosowane w Gorzowie Wielkopolskim okazały się bardzo skuteczne w wydzielaniu cennych surowców wtórnych z frakcji nadsitowej (>80 mm). Mniejsza ilość odzyskanych surowców wtórnych z odpadów w sortowni w Gorzowie Wielkopolskim, w porównaniu do instalacji w Bielsku-Białej, wynikała z braku separatora balistycznego i mniejszej liczby sorterów optopneumatycznych, mniejszego asortymentu wydzielanych surowców wtórnych (nie wydzielano folii i opakowań typu tetrapak).

◆ W okresie letnim w odpadach komunalnych znajduje się więcej surowców wtórnych niż zimą, co wiąże się z mniejszym spożyciem napojów w butelkach szklanych i z tworzyw sztucznych, jak również z tym, że papier i tektura spalane są w domowych kotłach. W okresie zimowym (grzewczym) w dzielnicach opalanych węglem kamiennym rośnie natomiast udział frakcji popiołu w odpadach komunalnych.

◆ Badania zostały przeprowadzone przed wprowadzeniem nowej ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach, która wpłynęła na rozwój i promocję selektywnej zbiórki odpadów, w związku z czym obecnie zawartość surowców wtórnych w zmieszanych odpadach komunalnych (niesegregowanych) jest mniejsza.

## LITERATURA

1. Dane z uchwał sejmików wojewódzkich w sprawie wykonania Wojewódzkich Planów Gospodarki Odpadami (z 31 stycznia 2014r.). Regionalne Centrum Edukacji Ekologicznej w Płocku, Płock 2014 (<http://www.rceeplock.nazwa.pl/blizejsmieci/index.php/wykaz-i-mapa-ripok-ow/wymogi-ripok>).
2. R.D. PASCOE, O.B. UDOUDO, H.J. GLASS: Efficiency of automated sorter performance based on particle proximity information. *Minerals Engineering* 2010, Vol. 23, pp. 806–812.
3. G. BONIFAZI, S. SERRANTI: Imaging spectroscopy based strategies for ceramic glass contaminants removal in glass recycling. *Waste Management* 2006, Vol. 26, pp. 627–639.
4. S.M. SAFAVI, H. MASOUMI, S.S. MIRIAN, M. TABRIZCHI: Sorting of polypropylene resins by color in MSW using visible reflectance spectroscopy. *Waste Management* 2010, Vol. 30, pp. 2216–2222.
5. A. RASEM HASAN, H. SOLO-GABRIELE, T. TOWNSEND: Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology: Part II. Sorting efficiencies. *Waste Management* 2011, Vol. 31, pp. 695–704.
6. F. BEZATIA, D. FROELICHA, V. MASSARDIERB, E. MARISA: Addition of X-ray fluorescent tracers into polymers, new technology for automatic sorting of plastics: Proposal for selecting some relevant tracers. *Resources, Conservation and Recycling* 2011, Vol. 55, pp. 1214–1221.
7. M. LOPEZA, M. SOLIVAA, F. XAVIER MARTINEZ-FARREA, M. FERNANDEZB, O. HUERTA-PUJOLA: Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting. *Resources, Conservation and Recycling* 2010, Vol. 54, No. 4, pp. 222–228.
8. V.S. ROTTER, T. KOST, J. WINKLER, B. BILITEWSKI: Material flow analysis of RDF-production processes. *Waste Management* 2004, Vol. 24, pp. 1005–1021.
9. J. de ARAUJO MORAIS, G. DUCOM, F. ACHOUR, M. ROUEZ, R. BAYARD: Mass balance to assess the efficiency of a mechanical-biological treatment. *Waste Management* 2008, Vol. 28, pp. 1791–1800.
10. U. ARENA, F. di GREGORIO: A waste management planning based on substance flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 2013, Vol. 74, pp. 82–100.
11. E. den BOER, R. SZPADT: Ocena cyklu życia systemu gospodarki odpadami na przykładzie Wrocławia (Life cycle assessment of the waste management system in the city of Wrocław). *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 3, ss. 39–44.
12. G. de FEO, C. MALVANO: The use of LCA in selecting the best MSW management system. *Waste Management* 2009, Vol. 29, No. 6, pp. 1901–1915.
13. A. MASSARUTTO, A. de CARLI, M. GRAFFI: Material and energy recovery in integrated waste management systems: A life-cycle costing approach. *Waste Management* 2011, Vol. 31, pp. 2102–2111.
14. F. CHERUBINI, S. BARGIGLI, S. ULGIATI: Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy* 2009, Vol. 34, pp. 2116–2123.
15. A.C. CAPUTO, P.M. PELAGAGGE: RDF production plants: I Design and costs. *Applied Thermal Engineering* 2002, Vol. 22, pp. 423–437.
16. A.C. CAPUTO, P.M. PELAGAGGE: RDF production plants: II Economics and profitability. *Applied Thermal Engineering* 2002, Vol. 22, pp. 439–448.
17. M. KARA: Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling* 2012, Vol. 68, pp. 21–28.
18. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 25 maja 2012r. w sprawie poziomów ograniczenia masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji przekazywanych do składowania oraz sposobu obliczania poziomu ograniczania masy tych odpadów. Dz. U. 2012, poz. 676.
19. Ustawa z 13 września 1996r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach. Dz. U. 1996, nr 132, poz. 622, wraz z późniejszymi zmianami.
20. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 29 maja 2012r. w sprawie poziomów recyklingu, przygotowania do ponownego użycia i odzysku innymi metodami niektórych frakcji odpadów komunalnych. Dz. U. 2012, poz. 645.
21. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 11 września 2012r. w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych. Dz. U. 2012, poz. 1052.
22. Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz. U. 2013, poz. 21.
23. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 8 stycznia 2013r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu. Dz. U. 2013, poz. 38.
24. W. HRYB: Properties of the residues of mechanical treatment of wastes in a sorting plant in the light of binding legal regulations. *Polish Journal of Environmental Studies* 2012, Vol. 21, No. 5A, pp. 117–123.
25. W. HRYB: Modernizacja zakładów zagospodarowania odpadów na przykładzie instalacji w Gorzowie Wielkopolskim. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 2013, vol. 15, nr 1, ss. 47–56.
26. W. HRYB: Sortownie odpadów w Polsce. *Recykling* 2011, nr 6, ss. 18–19.

**Hryb, W. Evaluation of Sorting Plant Effectiveness Based on the Municipal Waste Balance. *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 2, pp. 43–50.**

**Abstract:** Test results of mass balancing for two Polish waste sorting plants located in Bielsko-Biala and Gorzow Wielkopolski are presented. Both plants operate within the framework of mechanical biological treatment of municipal wastes. However, they differ in technological equipment and organization of sorting process, which is reflected in the plant operational efficacy. Test results allowed for evaluation of individual sorting stages effectiveness and their detailed diagnosis. Secondary raw materials recovered from municipal wastes in the sorting plant in Bielsko-Biala constituted 16% of the input waste mass,

raw materials for alternative fuel production – 10.5% while another 10.5% were the post-sorting waste remains. In the Gorzow Wielkopolski sorting plant secondary raw materials amounted to 7.6%, alternative fuel – to 11% and the post-sorting remains – to 24% of the input mass of municipal wastes. Additionally, a subscreen fraction directed for biological treatment, as well as debris and oversize waste were separated in both sorting plants. Recovery indexes determined for paper (91%) and PET (85%) fractions confirmed high operational effectiveness of optopneumatic separators applied in the sorting plant of Gorzow Wielkopolski.

**Keywords:** Solid waste management, secondary raw materials, optopneumatic sorter, recovery index.