

AMELIA WOYNAROWSKA, WITOLD ŻUKOWSKI*

WSPÓŁCZESNE METODY RECYKLINGU ODPADÓW ELEKTRONICZNYCH

MODERN METHODS OF ELECTRONIC WASTE RECYCLING

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę gospodarki odpadami elektronicznymi na świecie. Wskazano ich szkodliwy charakter dla ludzkiego zdrowia oraz środowiska. Przedstawiono przykładowe metody obecnie stosowane do przetwarzania oraz recyklingu tych niebezpiecznych odpadów w takich krajach jak Japonia, Korea Południowa oraz krajach Unii Europejskiej.

Słowa kluczowe: odpady elektroniczne, ZSEE, przetwarzanie, recykling

Abstract

The paper presents the issue of electronic waste management around the world. Harmful nature to human health and the environment was emphasized. Examples of modern methods used for processing and recycling of this hazardous waste in countries such as Japan, Korea, UE were presented.

Keywords: electronic waste, WEEE, transformation, recycling

* Mgr inż. Amelia Woynarowska, dr inż. hab. Witold Żukowski, prof. PK, Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Od dłuższego czasu obserwuje się lawinowy rozwój technologii informatycznych, co napędza ogromny wzrost produkcji i sprzedaży sprzętu elektrycznego i elektronicznego na świecie. Ciągły wzrost gospodarczy, pojawiające się nowe technologie oraz globalizacja na rynku urządzeń elektrycznych i elektronicznych powoduje znaczny i ciągły wzrost ilości odpadów elektrycznych i elektronicznych, co stanowi nowe wyzwanie dla środowiska [1].

W Unii Europejskiej każdego roku powstaje około 8 mln ton zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, (przy czym roczny przyrost tempa powstawania tych odpadów to 3–5% [2]), podczas gdy na całym świecie w skali roku powstaje około 20–50 mln ton tych niebezpiecznych odpadów [3]. Coraz większe użycie urządzeń cyfrowych przyczynia się znacząco do wzrostu ilości odpadów elektronicznych. Biorąc pod uwagę, że żywotność komputera wynosi obecnie około 5 lat, szacuje się, iż 17 mln komputerów rocznie jest wyrzucanych na świecie z powodu nieprawidłowego działania sprzętu lub przestarzałej technologii i chęci posiadania czegoś bardziej funkcjonalnego [4].

Według danych organizacji zajmującej się zdyktowaniem sprzętu elektrycznego i elektronicznego ElektroEko, z zużytego komputera i monitora o wadze 27 kg można odzyskać m.in.: 6,8 kg szkła, 6,2 kg tworzyw sztucznych, ok. 5,6 kg stali, ok. 3,8 kg aluminium, ok. 1,9 kg miedzi oraz 1,7 kg ołowiu. Z kolei zmielone tworzywa sztuczne pochodzące ze zużytego sprzętu gospodarstwa domowego stanowią surowiec wtórny wykorzystywany do produkcji np. kołpaków samochodowych. Natomiast materiały ze zużytych telefonów komórkowych: złoto, platynę, srebro czy miedź można wykorzystać do wytwarzania plomb dentystycznych, instrumentów muzycznych, a nawet czajników. W przypadku zużytych świetlówek aż 90% materiału można wykorzystać do produkcji nowych źródeł światła [5, 6].

Po okresie użytkowania sprzęty elektryczne i elektroniczne stają się tzw. e-odpadami, które stanowią bardzo ważny strumień odpadów, zaklasyfikowanych jako niebezpieczne, ze względu na zawartość różnorodnych składników, w tym również toksycznych, tj. Pb, Hg, Be, PBB (polibromowane bifenylo), PBDE (polibromowane etery difenylo) i PCB (polichlorowane bifenylo). Wszystkie te substancje mogą spowodować poważne skutki dla zdrowia, a także doprowadzić do skażenia gleby i produktów produkcji rolnej [7].

Unia Europejska w celu właściwego zarządzania tym niebezpiecznym strumieniem odpadów, jakimi są zużyte sprzęty elektryczne i elektroniczne (ZSEE), wprowadziła Dyrektywę 2002/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 stycznia 2003 r., której głównym celem jest ograniczenie ilości ZSEE, a ponadto ponowne użycie i recykling. Na państwa Unii Europejskiej został nałożony także obowiązek projektowania i produkcji urządzeń elektrycznych i elektronicznych w sposób umożliwiający ich demontaż oraz odzysk. W Dyrektywie również zawarty jest podział zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych na kategorie: wielkogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego (chłodziarki, zamrażarki, pralki, zmywarki, urządzenia kuchenne, urządzenia grzejne, wentylatory elektryczne, urządzenia klimatyzacyjne i sprzęt wentylujący), małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego (odkurzacze, żelazka, tostery, frytkownicy, rozdrabniacze, młynki do kawy, noże elektryczne, urządzenia do strzyżenia, suszenia włosów, szczotkowania golenia, masażu, zegary, wagi), sprzęt teleinformatyczny i telekomunikacyjny (komputery, laptopy, notebooki, notepad, drukarki, sprzęt kopiujący, kalkulatory, maszyny do pisania, terminale, telefaksy, telefony, automaty telefoniczne), sprzęt audiowizualny (odborniki radiowe i telewizyjne, kamery i sprzed video, sprzęt hi-fi, wzmacniacze dźwięku, instrumenty muzyczne), sprzęt

oświetleniowy (wysokoprężne lampy wyładowcze, ciśnieniowe lampy sodowe i lampy metalohalogenkowe, niskoprężne lampy sodowe), narzędzia elektryczne i elektroniczne (wierarki, piły, maszyny do szycia, urządzenia do skręcania, mielenia, piłowania, cięcia, nawiercania, robienia otworów, urządzenia do rozpylania, rozprowadzania, rozpraszania, kosiarki do trawy), zabawki, sprzęt rekreacyjny i sportowy (kolejki elektryczne lub tory wyścigowe, kieszonkowe konsole do gier video, gry video, sprzęt sportowy z elektrycznymi lub elektronicznymi częściami składowymi, automaty uruchamiane monetą, banknotem, żetonem), wyroby medyczne (sprzęt do: radioterapii, badań kardiologicznych; urządzenia medyczne wykorzystujące technikę nuklearną, sprzęt laboratoryjny do diagnostyki in vitro, analizatory), przyrządy do nadzoru i kontroli (czujniki dymu, regulatory ciepła, termostaty) oraz automaty do wydawania (automaty do wydawania: napojów, produktów stałych, pieniędzy – bankomaty) [8]. Podział odpadów elektronicznych obowiązujący w państwach Unii Europejskiej jest szczegółowy zwłaszcza w porównaniu ze Stanami Zjednoczonymi czy też niektórymi państwami Azji, gdzie odpady elektroniczne są zawężone praktycznie do jednej grupy wielkogabarytowych urządzeń gospodarstwa domowego.

Od wielu lat istnieje niekorzystna tendencja eksportu odpadów elektronicznych z krajów bogatych (Stany Zjednoczone i Unia Europejska) do krajów rozwijających się, takich jak Indie, Chiny czy Ghana. W tych krajach do tej pory cenne materiały odzyskiwane są metodami amatorskimi, co prowadzi do uwalniania substancji niebezpiecznych, m.in. rakotwórcze polichlorowane dibenzodioksyny. Obecnie eksport odpadów elektronicznych z krajów Unii Europejskiej jest prawnie zakazany, ale nadal zatrzymywane są nielegalne transporty do krajów rozwijających się. Jednak jest rzeczą niemożliwą określenie skali tego procederu, ponieważ kontroli poddawane jest średnio 3-5% towarów przekraczających granicę. Ponadto zdarza się często, że elektrośmieci są transportowane jako działający sprzęt używany [9].

Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny zawiera składniki, które można stosunkowo łatwo oddzielić mechanicznie, np. obudowy, stalowe elementy konstrukcyjne. Jednak z uwagi na coraz bardziej złożony charakter urządzeń, praktycznie każde z nich zawiera obwód drukowany z podzespołami elektronicznymi. Szczególnie dotyczy to urządzeń gospodarstwa domowego, które mają w coraz większym stopniu charakter urządzeń cyfrowych. Zintegrowane płyty elektroniki, które mają charakter kompozytowy (np. płyta nośna obwodów elektronicznych jest laminatem), posiadają wszystkie elementy składowe ściśle ze sobą zespolone, co jest gwarantem ich niezawodnego funkcjonowania. Demontaż poszczególnych elementów z takich płyt jest energochłonny (odlutowywanie) oraz pracochłonny i nie prowadzi do pozyskania elementów mogących być ponownie użytymi. Sam obwód drukowany, to płytka z materiału izolacyjnego (zbudowana z tworzywa sztucznego zespolonego z wypełnieniem o charakterze nieorganicznym) zawierająca połączenia elektryczne (tzw. ścieżki) oraz punkty lutownicze (tzw. pady), przeznaczone do montażu podzespołów elektronicznych. Materiały stosowane do produkcji obwodów drukowanych to laminaty szklano-epoksydowe lub materiały kompozytowe zawierające dodatkowo warstwę papieru albo filcu szklanego. Natomiast poszczególne elementy składowe płyty elektroniki, funkcjonalne elementy elektroniczne to przykładowo: tranzystory, rezystory, kondensatory, układy scalone, cewki, styki, przyłącza elektryczne i inne. Składają się one z różnych materiałów, m.in. metali, w tym metali szlachetnych, a także toksycznych, półprzewodników, tworzyw sztucznych.

Przykładowy skład materiałowy obwodu drukowanego z elementami elektroniki przedstawiono w tabeli 1. Okazuje się, iż 90% wag płyty elektroniki stanowią włókna szklane, żywice oraz miedź, których wzajemny stosunek wagowy wynosi 1:1:1 [10].

Skład materiałowy obwodu drukowanego [10]

Materiał	Średnia zawartość	Zawartość
Cu	Metale – 40%wag.	10–27%wag.
Al		1,3–4,8%wag.
Pb		1,0–4,2%wag.
Zn		0,2–2,2%wag.
Ni		0,3–2,4%wag.
Fe		1,2–8,0%wag.
Sn		1,0–5,3%wag.
Sb		0,06–0,4%wag.
Au		80–1000 ppm
Pt		4,6–30 ppm
Ag		110–3300 ppm
Pd		10–290 ppm
SiO ₂		Włókna szklane – 30%wag.
Al ₂ O ₃	6–7%wag.	
CaO	6–7%wag.	
Tytaniany itp.	3%wag.	
Polietylen	Żywice – 30 %wag.	10–16%wag.
Polipropylen		4,8%wag.
Poliestry		4,8%wag.
Epoksydy		4,8%wag.
Polichlorek winylu		2,4%wag.
Politetrafluoroetylen		2,4%wag.
Nylon		0,9%wag.

Ze względu na złożony i różnorodny, pod względem materiałowym, skład zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego bardzo ważny jest dobór odpowiedniej metody przetwarzania tych odpadów. Zawartość poszczególnych składników może być różna nawet w tej samej grupie odpadów, dlatego też mieszanie odpadów elektronicznych z różnych kategorii może doprowadzić do np. utrudniającego skutecznego odzysku zmniejszenia udziału cennych metali.

Recykling pozwala na zminimalizowanie ilości tych odpadów zalegających na składowiskach, co zapobiega zanieczyszczeniu gleby, wód gruntowych i powietrza. Ponadto przetwarzanie ZSEE jest ważne z punktu widzenia emisji dwutlenku węgla oraz związków toksycznych. Przykładowo przy produkcji 1kg miedzi powstaje ok. 4 kg CO₂.

Dodatkowo odzysk metali oraz innych składników ze zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych pozwala na uzyskanie znacznych korzyści gospodarczych, szczególnie w krajach, które dysponują bardzo ograniczonymi własnymi zasobami surowców naturalnych (Japonia) [11].

2. Metody recyklingu odpadów elektronicznych stosowane w Japonii

W Japonii do odpadów elektronicznych zalicza się tylko kilka rodzajów ZSEE, są to lodówki, pralki, klimatyzatory oraz telewizory. Pozostałe odpady elektroniczne zaklasyfikowane w Unii Europejskiej jako niebezpieczne, w Japonii traktowane są jako stałe odpady komunalne. W 1998 roku w tym kraju została uchwalona ustawa dotycząca recyklingu wielkogabarytowych urządzeń gospodarstwa domowego, która wprowadziła obowiązek związany z recyklingiem zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego na producentów i detaliistów sprzętu gospodarstwa domowego [12]. O ile część typowych metali (takich jak żelazo) odzyskiwanych jest łatwo w trakcie prostej obróbki mechanicznej odpadów, o tyle pozostałe metale rzadko są odzyskiwane, a ich dalsze losy nie są jasne.

W miejscowości Hitachi w Japonii pracuje jedna z kilku typowych instalacji stosowanych do obróbki odpadów komunalnych, a także większości odpadów elektronicznych. Przetwarza się tam urządzenia gospodarstwa domowego wielkogabarytowe (sprzęty grzejne oraz do gotowania), małowabarytowe (odkurzacze, tostery, zegary), a także sprzęt IT i urządzenia łączności (telefony komórkowe, drukarki), urządzenia konsumenckie (sprzęt audio, wideo, kamery), sprzęt oświetleniowy. Przed procesem recyklingu z urządzeń usuwane są takie elementy jak baterie i akumulatory.

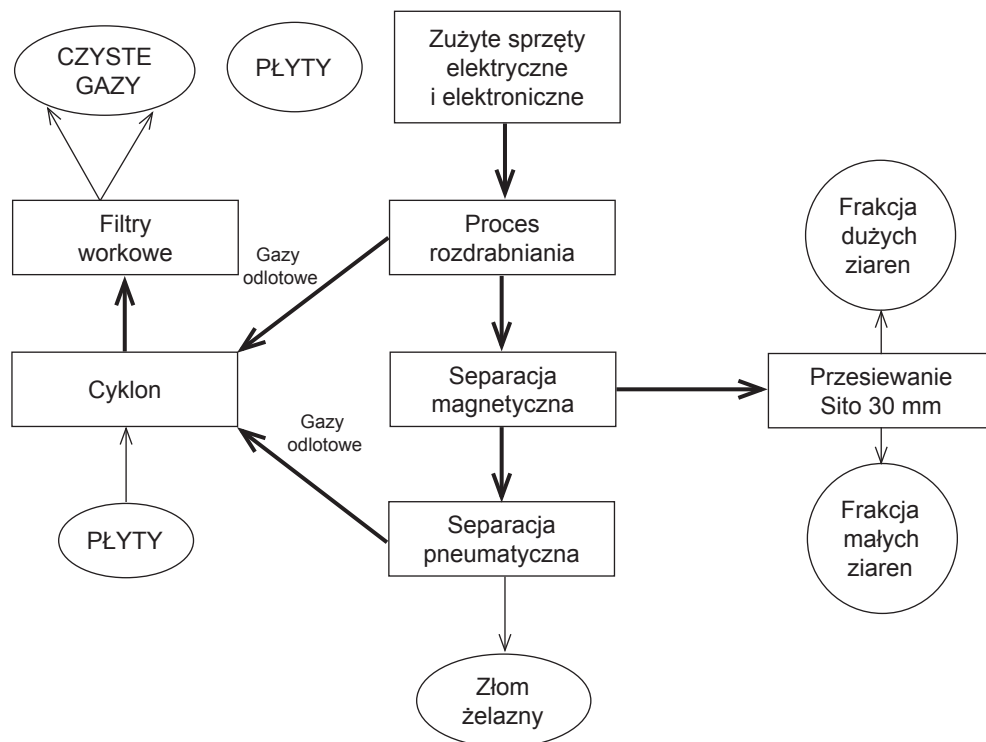
Instalacja w Hitachi ma zdolność przetwarzania około 8 ton/h. Technologia przetwarzania odpadów obejmuje proces rozdrobnienia na typowym rozdrabniaczu (strzępiarka), separację magnetyczną oraz przesiewanie przez sito 30 mm, a także separację pneumatyczną mającą na celu rozdzielenie lekkich i ciężkich materiałów, takich jak tworzywa sztuczne i cząstki złomu żelaznego.

Powstające gazy odlotowe po procesie rozdrabniania oraz separacji pneumatycznej kieruje się na cyklon, a następnie na filtry workowe w celu odpylenia tych gazów. Pyły wyłapanie przez cyklon zawracane są do procesu przesiewania na sicie 30 mm, natomiast pyły uzyskane na filtrach workowych są spalane. Po procesie separacji magnetycznej drobne odpady przesiewa się na sicie, w wyniku czego otrzymuje się frakcję dużych ziaren (powyżej 30 mm) kierowanych do procesu spalania oraz frakcję małych ziaren (poniżej 30 mm) odprowadzanych bezpośrednio na składowisko. W wyniku separacji pneumatycznej oddzielany jest złom żelazny, który następnie jest sprzedawany. Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat tej technologii przetwarzania odpadów elektronicznych [13].

3. Metody recyklingu odpadów elektronicznych stosowane w Korei Południowej

W Korei Południowej recykling ZSEE jest jeszcze we wczesnym stadium w zakresie rozwoju technologii. Ze względu na wysoki koszt transportu i recyklingu tych odpadów tylko niewielki ich ułamek masowy jest poddawany procesowi recyklingu i odzysku [14]. W kraju tym do odpadów elektronicznych zalicz się: lodówki, pralki, klimatyzatory, komputery, telewizory, sprzęt audio, telefony komórkowe, drukarki, kserokopiarki, faksy.

Korea Południowa posiada dwa systemy recyklingu zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych prowadzony przez producentów oraz zakłady recyklingu kierowane przez prywatnych operatorów. Centra recyklingu producentów (np. Yongin recycling centrum, Asan Samsung recycling centrum, Chilseo LG recycling centrum) są zarządzane przez



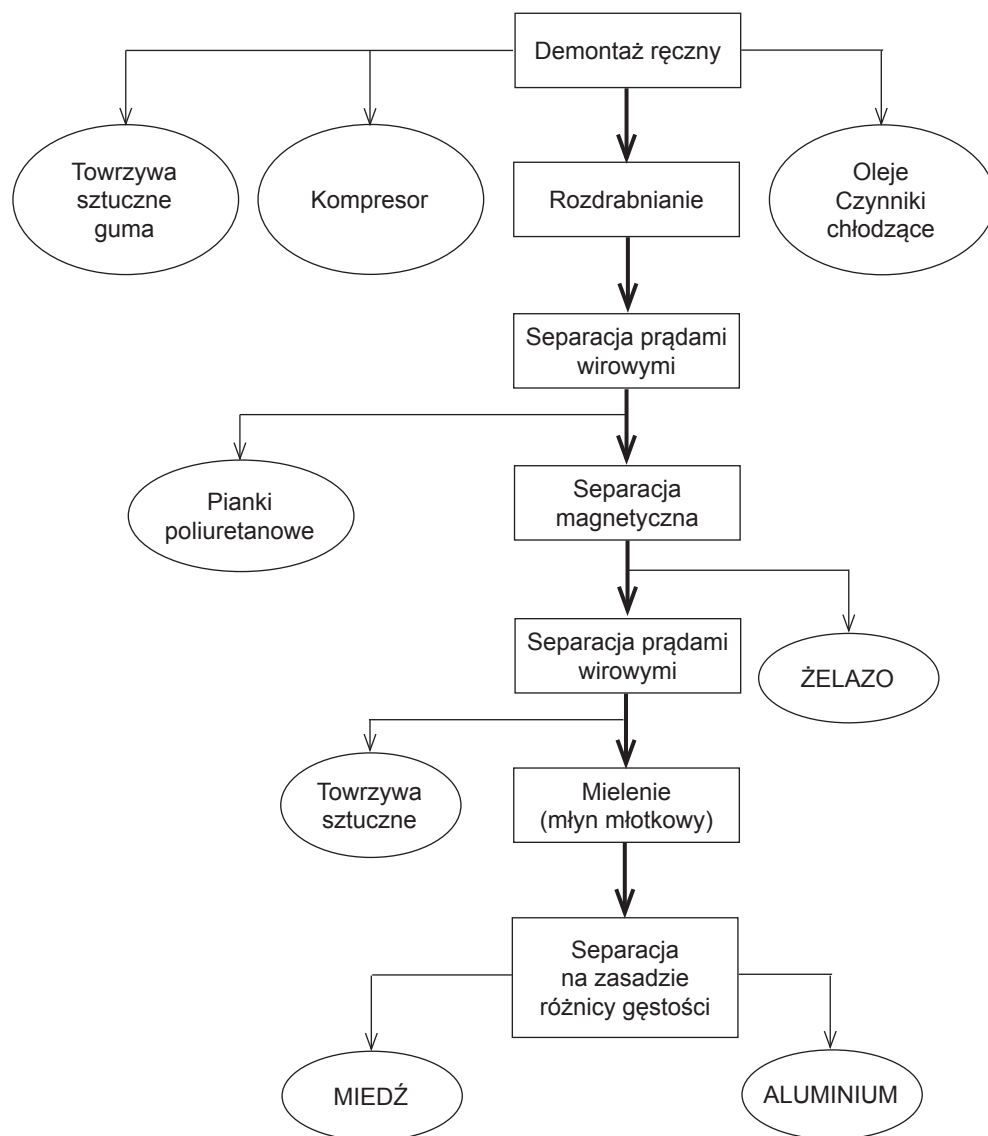
Rys. 1. Schemat przetwarzania odpadów elektronicznych w Hitachi w Japonii [13]

Fig. 1. Scheme of processing electronic waste in Hitaci in Japan

KOREA AEE. Przetwarzają oni sprzęt wielkogabarytowy pochodzący z gospodarstwa domowego: lodówki, pralki, klimatyzatory. Natomiast prywatne zakłady recyklingu zazwyczaj przetwarzają mniejsze odpady elektroniczne, najczęściej są to telewizory, telefony komórkowe i komputery. Jednak recykling w zakładach prywatnych odpadów elektronicznych nie jest dobrze znany, ponadto dokładne informacje dotyczące ilości odpadów poddawanych takiej obróbce oraz procedur stosowanych jest w dużej mierze niedostępny [15].

Na rysunku 2 przedstawiono schemat procesu stosowany w celu odzysku cennych materiałów (metale kolorowe, miedź, aluminium) z odpadów elektronicznych w jednym z zakładów recyklingu pod kontrolą producentów w Korei. Technologia przetwarzania obejmuje demontaż ręczny, rozdrobnienie, separację magnetyczną oraz prądowo-wirową, a także separację na cyklonie. Duże znaczenie ma pierwszy etap, w którym następuje ręczny demontaż przestarzałych urządzeń konsumenckich w celu odzyskania cennych materiałów, a także usunięcie toksycznych elementów. Na tym etapie usuwane są na przykład kable, obwody drukowane, czynniki chłodnicze, kompresory z lodówek w celu wyeliminowania emisji toksycznych związków podczas recyklingu [16, 17].

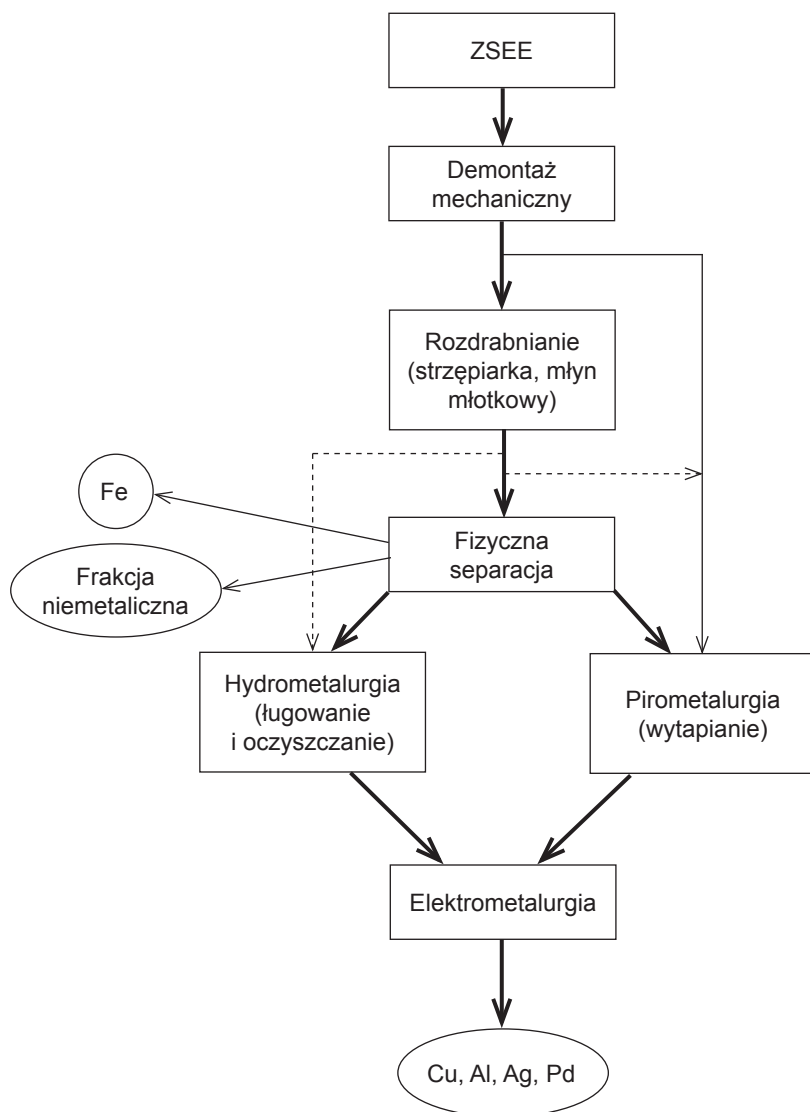
Separacja prądami wirowymi polega na wytworzeniu prądów wirowych, w elementach poddanych rozdzieleniu, przez obracający się z dużą prędkością rotor magnetyczny. Prądy te indukują w metalach nieżelaznych pole magnetyczne skierowane przeciwnie do pola magnetycznego rotora. Efekt jest taki, że metal nieżelazny jest odpychany przez magnes i wy-



Rys. 2. Schemat procesu recyklingu odpadów elektronicznych kierowany przez producentów w Korei [15]

Fig. 2. Scheme of the process electronic waste which is managed by producers in Korea

rzucany poza strumień surowca. Metale żelazne zachowują się odmiennie – są przyciągane przez rotor i odrywane przez taśmę spadają pod separatorem. Podczas prowadzenia procesu recyklingu odzyskuje się tworzywa sztuczne, gumę, a także takie metale jak żelazo, miedź i aluminium. Informacje na temat zanieczyszczeń emitowanych do powietrza przez zakłady prowadzące recykling zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych w Korei są nieznanne [15].



Rys. 3. Schemat procesu recyklingu zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych badany we Włoszech [25]

Fig. 3. Scheme of recycling process electrical and electronic equipment waste which is tested in Italy

4. Metody recyklingu analizowane w krajach Unii Europejskiej

W kilku krajach Unii Europejskiej, w tym np. we Włoszech, obecnie bada się możliwości recyklingu odpadów elektronicznych. Jak wskazują przykłady krajów azjatyckich do recyklingu najczęściej stosuje się metody obróbki mechanicznej oraz separacji fizycznej, ponieważ są to metody proste i związane są z niską szkodliwością dla środowiska. Natomiast

stosunkowo rzadko proces przetwarzania i odzysku prowadzony jest z udziałem metod pirometalurgicznych i hydrometalurgicznych, z tego względu, iż te metody mogą generować duże ilości związków toksycznych stanowiących odpady stałe i ścieki, które należy oczyścić, co stwarza duże koszty związane z aparaturą [18, 19].

Na rysunku 3 przedstawiony jest schemat badanego procesu recyklingu zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych. Wstępnym etapem jest selektywny demontaż poszczególnych urządzeń i podzielenie poszczególnych elementów na frakcje, takie jak metale (Fe, Cu, Al itd.), tworzywa sztuczne, ceramika, papier, drewno oraz elementy o charakterze toksycznym, takie jak kondensatory, kompresory, baterie, monitory, obwody drukowane. Te składniki mogą być ponownie wykorzystane lub kierowane do procesu recyklingu [20, 21]. Po usunięciu i posortowaniu elementów, składniki zawierające metale takie jak obwody drukowane poddawane są rozdrobnieniu przy użyciu strzępiarki lub młyna młotkowego. Odpowiednie rozdrobnienie konieczne jest do dalszej obróbki fizycznej i procesów hydrometalurgicznych [22, 23].

Podczas przetwarzania metodami fizycznymi odpady poddaje się separacji magnetycznej, elektrostatycznej i prądowo-wirowej, w wyniku których otrzymuje się żelazo, frakcję nieżelazną i frakcję niemetaliczną. Następnie uzyskana frakcja metaliczna przetwarzana jest metodą pirometalurgiczną i hydrometalurgiczną w celu odzysku metali szlachetnych. W porównaniu z metodą pirometalurgiczną proces hydrometalurgiczny wymaga stosunkowo niewielkich kosztów inwestycyjnych oraz powoduje mniejsze zagrożenie dla środowiska (nie powstają gazy ani pyły zanieczyszczające powietrze) oraz pozwala na uzyskanie wysokiego stopnia odzysku. Dotychczas najczęściej stosowane czynniki ługujące w procesie hydrometalurgicznym to woda królewska, cyjanek, halogenki, tiomocznik oraz tiosiarczany. Zastosowane czynniki powodują znaczne zanieczyszczenia, dlatego też otrzymywane produkty poddawane są procesowi separacji oraz procedurze oczyszczania [23, 24]. Przeprowadzono również próbę ługowania w środowisku kwaśnym w obecności nadtlenu wodoru oraz bez jego udziału. Uzyskane wyniki pozwoliły na wywnioskowanie, iż obecność utleniacza H_2O_2 ma znaczący wpływ na końcowy odzysk metali. Ostatnim etapem jest elektrometalurgia, która polega na otrzymaniu oraz oczyszczeniu metali przy użyciu prądu elektrycznego. W wyniku tego procesu otrzymuje się takie metale jak miedź, glin, srebro czy pallad [25].

5. Wnioski

Recykling zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego jest niewątpliwie bardzo ważnym zadaniem gospodarki odpadami, który może być realizowany w zróżnicowany sposób. Biorąc pod uwagę, iż skład chemiczny ZSEE jest bardzo zróżnicowany, zawiera on szereg metali, w tym również metale toksyczne, których składowanie powoduje zagrożenie dla ludzkiego zdrowia i środowiska najlepszym rozwiązaniem byłoby unieszkodliwienie odpadów elektronicznych połączone z odzyskiem energii oraz pełnym odzyskiem surowców zastępujących te, które wciąż musimy pozyskiwać ze środowiska naturalnego.

Przedstawione przykłady wskazują, iż o ile gospodarka odpadami realizowana jest w różnych rejonach świata, to odbywa się ona na odmiennych poziomach zaawansowania, a dominują w niej proste metody mechaniczne. Niemożliwe jest przez to pełne wykorzystanie potencjału surowcowego i energetycznego zawartego w ZSEE.

W państwach Unii Europejskiej również w pierwszej kolejności stosowane są metody demontażu mechanicznego oraz separacja fizyczna, ze względu na niski koszt i dość dużą powszechność urządzeń stosowanych do tego typu separacji. Dodatkowo próbuje się prowadzić odzysk przy użyciu metod chemicznych, takich jak hydrometalurgia, pirometalurgia oraz elektrometalurgia. Metody te z pewnością mogą być dalej rozwijane, aby uzyskane efekty były jak największe, a szkody dla środowiska jak najmniejsze.

Literatura

- [1] Khetriwal D.S., Kraeuchi P., Widmer R., *Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration e learning from the Swiss experience*, Journal of Environmental Management, 90/2009, 153-165.
- [2] Drechse C.H., *Mechanical Processes for Recycling Waste Electric and Electronic Equipment with the Rotor shredder and Rotor Impact Mill*, Aufbereitungs Technik, 2006, 47.
- [3] Petranikova M., *Treatment of End of Life Computers*, Diploma work. Technical University of Kosice, Kosice, Slovakia 2008.
- [4] Rao S.R., *Recycling Metal*, Waste Management Series, vol. 7 – Resources Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes, Elsevier Science (Chapter 7), 2006.
- [5] Elektroeko (www.elektroeko.pl).
- [6] Zużyte świetlówki (http://www.zuzyteswietlowki.pl/?page_id=56).
- [7] Wang H.M., Yu I.J., Han M., Yang S.W., *Estimated PBDE and PBB congeners in soil from an electronic waste disposal site*, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 83/2009, 789-793.
- [8] Dyrektywa 2002/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE).
- [9] WWF (www.wwf.pl).
- [10] Williams P.T., *Valorization of Printed Circuit Boards from Waste Electrical and Electronic Equipment by Pyrolysis*, Waste Biomass Valor, 1/2010, 107-120.
- [11] Hayes P., *Process Principles in Minerals and Materials Production*, Sherwood, Australia 1993, 28-32.
- [12] Aizawa H., Yoshida H., Sakai S., *Current results and future perspective for Japanese recycling of home appliances*, Resour Conserv Recycl, 52/2008, 1339-1410.
- [13] Masahiro O., Hirofumi S., Atsushi T., Hidetaka T., *Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process*, Waste Management, 32 (2012), 96-103.
- [14] Jang Y., Lim S., *National survey of e-waste material flow analysis*, Final Report submitted to Korean Association of Electronics Environment, Yongin 2007.
- [15] Yong-Chul J., *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management in Korea: generation, collection, and recycling systems*, Waste Management Research in Korea II, 12/2010, 283-294.
- [16] Wang D., Cai Z., Jiang G., Leung A., Wong M., Wong W., *Determination of polybrominated diphenyl ethers in soil and sediment from an electronic waste recycling facility*, Chemosphere, 60/2005, 810-816.

- [17] Sjödin A., Carlsson H., Thuresson K., Sjölin S., Bergman Å., Östman C., *Flame retardants in indoor air at an electronic recycling plant and at other work environments*, Environ Sci Technol, 35/2001, 448-454.
- [18] Cui J., Zhang L., *Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review*, Journal of Hazardous Materials, 158/2008, 228-256.
- [19] Yazici E.Y., Deveci H., *Recovery of metals from E-wastes*, The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, 48 (3)/2009, 3-18.
- [20] Antrekowitsch H., Potesser M., Spruzina W., Prior F., *Metallurgical recycling of electronic scrap*, EPD Congress 2006, 899-908.
- [21] Cui J., Forssberg E., *Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review*, Journal of Hazardous Materials B99, 2003, 243-263.
- [22] Duan C., Wen X., Shi C., Zhao Y., Wen B., He Y., *Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium*, Journal of Hazardous Materials, 166 (1)/2009, 478-482.
- [23] Chmielewski A.G., Urbański T.S., Migdał W., *Separation technologies for metals recovery from industrial wastes*, Hydrometallurgy, 45/1997, 333-344.
- [24] Lee C.H., Tang L.W., Popuri S.R., *A study on the recycling of scrap integrated circuits by leaching*, Waste Management & Research, 2010, 1-9.
- [25] Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E.Y., Deveci H., *Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling*, Minerals Engineering, 25/2012, 28-37.