

Marta Wójcik

Feliks Stachowicz

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

RECYKLING ZUŻYTEGO SPRZĘTU ELEKTRYCZNEGO I ELEKTRONICZNEGO JAKO PRZYKŁAD ZRÓWNOWAŻONEJ GOSPODARKI ODPADAMI

Streszczenie

W ostatnich dziesięcioleciach obserwuje się gwałtowny rozwój technologii informatycznych, co przyczynia się do zwiększenia popytu na sprzęt elektryczny i elektroniczny. Według danych zawartych w raporcie Głównego Urzędu Statystycznego z 2015 r., 77,9% gospodarstw domowych jest wyposażonych przynajmniej w jeden komputer, a dostęp do Internetu posiada 72% mieszkańców wsi. Udział gospodarstw wyposażonych w sprzęt informatyczny w Polsce wschodniej stopniowo zrównuje się z poziomem dla Polski zachodniej i centralnej, co przyczynia się do zacierania dysproporcji pomiędzy regionami kraju. Rezultatem wzrastającego zapotrzebowania na urządzenia elektryczne i elektroniczne jest wzrost wytwarzanych e-odpadów, których ilość na świecie szacuje się na około 20–50 mln ton rocznie. Jednakże, niewłaściwie prowadzona gospodarka e-odpadami może doprowadzić do skażenia gleby i wyrobów uzyskanych podczas produkcji rolniczej. Ze względu na złożoną i skomplikowaną charakterystykę materiałową odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych, niezwykle istotne jest dobranie odpowiedniej metody ich przetwarzania. W pracy przedstawiono stan rynku elektronicznego w Polsce oraz zaprezentowano przegląd technologii odzysku metali z wymienionych odpadów. Analiza tematu wykazuje, że recykling e-odpadów jest rozwiązaniem ograniczającym ich szkodliwy wpływ na środowisko i umożliwiającym odzyskanie cennych surowców.

Słowa kluczowe: odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych, e-odpady, gospodarka odpadami, recykling

RECYCLING OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT AS AN EXAMPLE OF SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT

Summary

In recent years, there has been an increased development in using of IT technologies. This phenomena results in the increase of demand on electrical and electronic equipment. According to Central Statistical Office Report, approximately 77.9% of households has at least one computer in 2015 in Poland. It is estimated that the access to the Internet has 72% of rural population. The share of households in Easter Poland which hold IT equipment is comparable

with the level for Central and Western Poland. It contributes to the blurring the disproportion between regions of Poland. The main result of the increasing consumption on electrical and electronic equipment is huge amount of produced e-waste. The amount of waste electrical and electronic equipment is estimated on approximately 20-50 million tons every year. Inappropriate waste management could lead to soil and agricultural products contamination. Due to the complex structure of waste electrical and electronic equipment, it is necessary to find an effective utilization method. This article presents the situation of electricity market in Poland. Additionally, recycling methods of e-waste are presented. The study on this issue shows that the recycling of waste electrical and electronic equipment is a solution which could limit the harmful influence of aforementioned waste on the environment. In addition, it is possible to recover valuable metals from waste.

Keywords: waste electrical and electronic equipment, e-waste, waste management, recycling

1. Wprowadzenie

Produkcja urządzeń elektrycznych i elektronicznych jest jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi przemysłu. Nowe technologie w dziedzinie ICT (*Information and Communication Technology*) skutkują opracowywaniem i wprowadzaniem na rynek coraz bardziej zaawansowanych i wielofunkcyjnych urządzeń. Postęp techniczny determinuje wzrost ilości dostępnego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, co w znacznym stopniu wpływa na zwiększenie masy powstających e-odpadów.

Wyeksploatowane urządzenia elektryczne i elektroniczne są rodzajem odpadów, których wytwarzana masa wzrasta najszybciej. Corocznie na świecie powstaje ponad 40 milionów Mg elektroodpadów, z czego w samej Polsce około 500 tysięcy Mg [2]. Obecnie odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych stanowią już 8% wszystkich odpadów powstających w gospodarstwach domowych [4]. Wzrost ilości produkowanego złomu elektrycznego i elektronicznego wymusza opracowanie nowych rozwiązań technologicznych w zakresie prawidłowego unieszkodliwiania, gdyż niewłaściwe postępowanie z e-odpadami stwarza poważne zagrożenie dla środowiska oraz zdrowia ludzi. Niebezpieczne związki zawarte we wspomnianym rodzaju odpadów mogą przedostać się do gleby, a następnie do wód gruntowych. Potrzeba redukcji negatywnego wpływu e-odpadów na środowisko przyczyniła się do rozwoju tzw. ekologii zorientowanej na ochronę środowiska przyrodniczego [5].

Odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych wykazują duży potencjał ze względu na zawartość cennych surowców, w tym metali szlachetnych. Szacuje się, że z 1 mln telefonów komórkowych można odzyskać do 350 kg srebra, 34 kg złota, 15 kg palladu oraz 16 ton miedzi. Inne badania wykazały, że w 1 tonie zużytych aparatów fotograficznych znajduje się około 1 kg białego metalu o łącznej wartości 3,5 tys. złotych [11]. Według Gołąbka [1], wartość srebra odzyskanego z urządzeń grupy ICT w ciągu roku może dochodzić nawet do 1,2 mln zł. Z tego względu głównym celem krajowej gospodarki odpadami jest opracowanie rozwiązań organizacyjnych, technicznych i informacyjnych, które umożliwiłyby odzysk cennych surowców zawartych w złomie elektrycznym i elektronicznym z jednoczesnym uwzględnieniem zasad ochrony środowiska. Rozwój prawidłowych technik recyklingu e-odpadów może przyczynić się również do aktywizacji społecznej poprzez tworzenie nowych

miejsc pracy oraz do ograniczenia wydobycia surowców, co ma szczególne znaczenie w przypadku państw o niskich zasobach naturalnych.

Prezentowany artykuł zawiera charakterystykę rynku elektronicznego i elektrycznego w Polsce oraz zasady gospodarki odpadami ze szczególnym uwzględnieniem elektroodpadów. Przedstawiono również obowiązujące akty prawne dotyczące postępowania ze złomem urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz wskazano możliwości technologiczne w zakresie recyklingu wspomnianych odpadów, zorientowane na ochronę środowiska przyrodniczego.

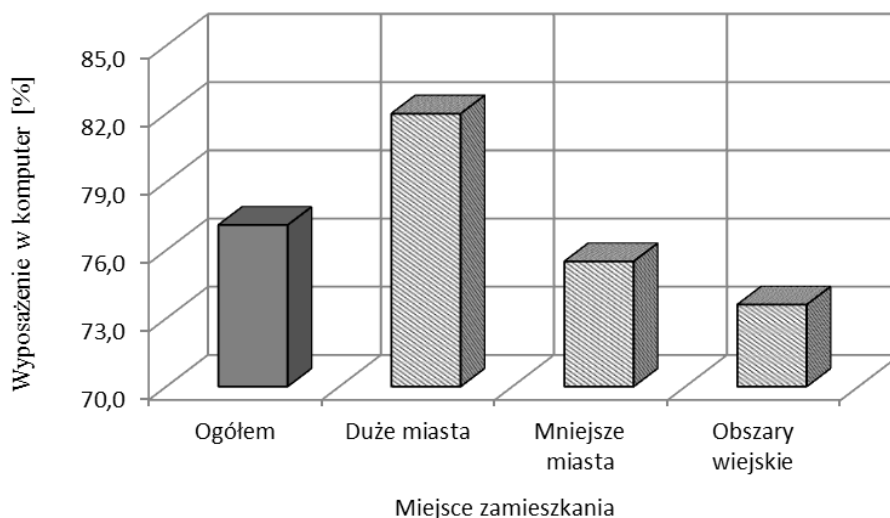
2. Rynek sprzętu elektrycznego i elektronicznego w Polsce

Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie z dnia 11 września 2015 r. o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym, sprzęt elektroniczny i elektryczny oznacza urządzenie, którego prawidłowe działanie jest uwarunkowane dopływem prądu elektrycznego lub obecnością pól elektromagnetycznych, służące do wytwarzania, przesyłu lub pomiaru prądu elektrycznego lub pól elektromagnetycznych [21, 24].

Wraz z rozwojem nowych technologii, co roku obserwuje się systematyczny wzrost produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Szacuje się, że 25% światowej produkcji wspomnianych urządzeń stanowi rynek europejski [27]. W ciągu ostatniej dekady produkcja sprzętu elektronicznego w Europie wzrosła średnio o 5% w ciągu roku. Intensywny rozwój techniczny powoduje, że w przyszłości możliwy jest przyrost rzędu 8-10% [22]. Jednocześnie postęp w dziedzinie technologii ICT przyczynił się do znaczącego skrócenia cyklu życia sprzętu elektronicznego. Według Wysockiej-Golec [27], średni czas użytkowania komputera i telefonów komórkowych wynosi obecnie od 2 do 3 lat, podczas gdy w 1997 r. sprzęt użytkowano nawet przez okres 7 lat. Badania przeprowadzone przez Ali-Kurikka [26] wykazały, że ponad 60% wyrzucanych przez gospodarstwa domowe odpadów w postaci odbiorników telewizyjnych jest nadal sprawnych, a głównym powodem wymiany jest często chęć posiadania nowszego modelu. Dodatkowo brak podejmowania działań naprawczych lub modernizacji sprzętu elektrycznego i elektronicznego wynika również z przesłanek ekonomicznych, gdyż często koszty naprawy przewyższają wartość urządzeń [5]. Efektem tego jest systematyczny wzrost ilości generowanych e-odpadów, które nierzadko są niebezpieczne dla środowiska i wymagają odpowiedniego unieszkodliwiania.

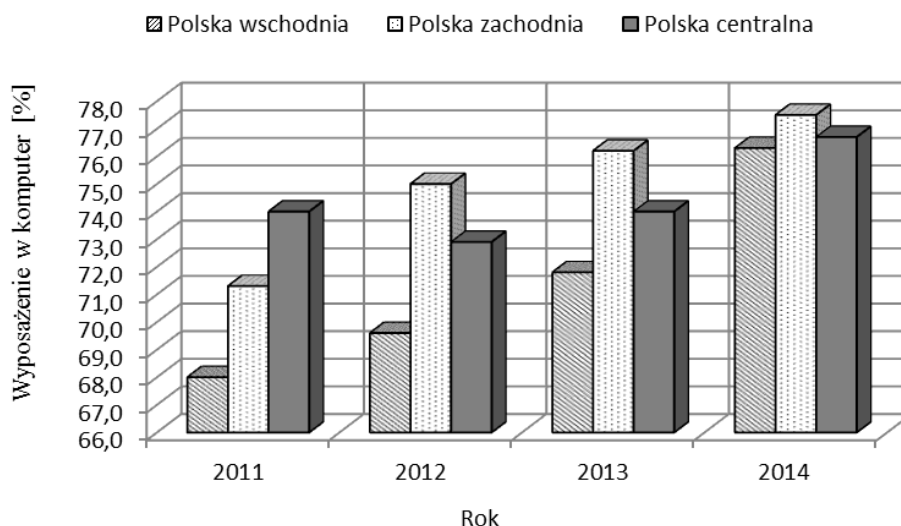
Gwałtowny rozwój rynku sprzętu elektrycznego i elektronicznego obserwuje się również w Polsce. Według danych zawartych w raporcie Głównego Urzędu Statystycznego [14], Polska znajduje się na 15 miejscu wśród wszystkich państw świata o najszybszym wzroście liczby komputerów w gospodarstwach domowych. W 2014 r. około 77% domów w kraju posiadało komputer stacjonarny lub przenośny, zaś na terenach wiejskich odsetek ten wyniósł 73,6% (ryc. 1). Jednocześnie obserwuje się zacieranie dysproporcji pod względem wyposażenia gospodarstw domowych w technologie ICT między ścianą wschodnią (województwa: podlaskie, lubelskie, podkarpackie, świętokrzyskie) a innymi regionami kraju (ryc. 2) [32].

Ryc. 1. Wyposażenie gospodarstw domowych w komputer z uwzględnieniem miejsca zamieszkania



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: <http://ptezg.pl/Files/files/zn3/barska.pdf> (dostęp: 21.07.2017)

Ryc. 2. Wyposażenie gospodarstw domowych w komputer z podziałem na regiony kraju



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: *Spoleczeństwo informacyjne w Polsce w 2014 r. Raport Głównego Urzędu Statystycznego*, <http://stat.gov.pl/> (dostęp: 20.07.2017)

Nadmierna ilość e-odpadów, które stwarzają problem z utylizacją w wielu regionach świata, stanowi poważny problem z punktu widzenia gospodarki odpadami, w tym również na terenie Pogórza Dynowskiego. W związku z powyższym podjęcie tematyki recyklingu elektroodpadów w prezentowanym artykule jest jak najbardziej uzasadnione.

3. Charakterystyka odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów, wyeksploatowane urządzenie elektryczne i elektroniczne zostały zaklasyfikowane do grupy 16: odpady nieujęte w innych grupach oraz podgrupy 16 02: odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych [20]. W zależności od typu urządzenia i zastosowanych materiałów na etapie procesu produkcyjnego, poszczególnym typom elektroodpadów nadano indywidualne sześciocyfrowe kody. Ze względu na zawartość metali ciężkich oraz substancji toksycznych, m.in. PCB, PBB, Pb, Hg i Cd, większość e-odpadów klasyfikuje się jako odpady niebezpieczne o dużej szkodliwości dla środowiska i człowieka.

Co roku na świecie powstaje od 20 do 50 mln Mg urządzeń elektrycznych i elektronicznych, które na skutek zakończenia eksploatacji stają się elektroodpadami [17]. Najwięcej złomu elektrycznego i elektronicznego wytwarza się w Stanach Zjednoczonych oraz w Chinach [15]. W Unii Europejskiej corocznie powstaje blisko 8 mln ton zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, z wyraźną dominacją Niemiec i Rosji [31]. Roczne tempo przyrostu wspomnianych odpadów kształtuje się na poziomie 3–5% i jest ponad 3-krotnie większe niż w przypadku odpadów komunalnych [31]. Dodatkowo, ilość elektroodpadów w przeliczeniu na 1 mieszkańca wynosi od 5 do 30 kg/osobę rocznie, co stwarza poważny problem z odpowiednim zagospodarowaniem [10].

Obecność w odpadach urządzeń elektrycznych i elektronicznych toksycznych składników pozwala na ich zaklasyfikowanie do odpadów niebezpiecznych. Według Namiasa [10], elektroodpady mogą zawierać w swoim składzie do 60 różnych metali i substancji toksycznych, o udowodnionym negatywnie wpływie na zdrowie ludzi oraz zwierząt (tab. 1, tab. 2). Inne badania wykazały, że ilość kadmu zawartego w jednej baterii telefonu komórkowego może skutkować zanieczyszczeniem nawet do 600 m³ wody [1].

Zawartość substancji o dużej szkodliwości powoduje, że gospodarka e-odpadami jest jednym z priorytetowych celów Unii Europejskiej. Od wielu lat niepokojącym zjawiskiem jest wywóz złomu elektrycznego i elektronicznego z krajów bogatych, w szczególności z Europy Zachodniej i Stanów Zjednoczonych, do państw rozwijających się, m.in. do Indii czy Ghany. W państwach o niskim poziomie rozwoju recykling e-odpadów odbywa się z użyciem amatorskich metod, co skutkuje uwalnianiem rakotwórczych substancji. Pomimo obowiązującego od kilku lat zakazu wywozu złomu elektrycznego i elektronicznego z Unii Europejskiej, nadal notowane są przypadki wspomnianego zjawiska [16]. Jednym z powodów, dla których eliminacja nielegalnego wywozu e-odpadów staje się niemożliwa, jest niedostateczna kontrola towarów transportowanych za granicę. Dodatkowo część elektroodpadów jest eksportowanych jako działający sprzęt używany [6].

Tab. 1. Substancje zawarte w odpadach urządzeń elektrycznych i elektronicznych

Grupa związków	Składnik	Występowanie
Halogenki	PCB	Kondensatory, transformatory
	PBB	Środki uniepalniające tworzywa sztuczne
	Eter difenyłowy	Środki uniepalniające tworzywa sztuczne
	Chlorofluorowęglan	Agregaty chłodzące, pianki izolacyjne
	PCV	Obudowy przewodów
Metale	Arsen	Diody świetlne
	Bar	Ekran monitorów
	Beryl	Skrzynki zasilające zawierające
	Kadm	Baterie niklowo-kadmowe, tusze i tonery do drukarek
	Chrom	Twarde dyski, dyskietki
	Ołów	Baterie, płytki drukowane, ekrany monitorów CRT
	Lit	Baterie litowe
	Rtęć	Lampy fluorescencyjne, baterie alkaliczne
	Nikiel	Baterie niklowo-kadmowe
	Metale ziem rzadkich	Warstwy fluorescencyjne
	Selen	Starsze typy kopiarek i kser

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: A. Kumar, M. Holuszko, D.C.R. Espinosa, *E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practises, Resources, Conservation and Recycling*, nr 122, 2017, s. 32–42.

W celu usprawnienia gospodarki e-odpadami konieczne jest opracowanie planu postępowania i wskazanie koordynatora podejmowanych działań. Sprawne funkcjonowanie gospodarki odpadami wymaga ingerencji i współpracy wszystkich zaangażowanych podmiotów, tj. użytkowników, zakładów organizujących zbiórkę, zakładów przetwarzania oraz recyklerów [5]. Niezbędne jest również implementowanie aktów prawnych, jednoznacznie określających hierarchię postępowania z tego typu odpadami. Prawdopodobnie kształtowane wzorce postępowania z e-odpadami mogą przyczynić się do redukcji zanieczyszczenia środowiska i dodatkowo przynieść korzyści ekonomiczne w postaci ograniczenia zużycia zasobów naturalnych.

Tab. 2. Oddziaływanie substancji zawartych w elektroodpadach na człowieka i zwierzęta

Związek	Możliwe oddziaływanie
Antymon	problemy skórne
Kadm	uszkodzenie nerek i kości, kumulacja w organizmie
Ołów	bardzo toksyczny dla ludzi i zwierząt, oddziaływanie na układ nerwowy w szczególności u dzieci
Rtęć	wysoka toksyczność i zdolność do biokumulacji, uszkodzenie ośrodkowego układu nerwowego i nerek
Nonylofenol	uszkodzenie DNA
Eter difenyłowy	wpływ na układ odpornościowy

Związek	Możliwe oddziaływanie
PCB	uszkodzenie wątroby i układu nerwowego, działanie rakotwórcze
Polichlorowany naftalen	toksyczny dla zwierząt i ludzi, wpływ na skórę, wątrobę, układ nerwowy i układ rozrodczy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: A. Kumar, M. Holuszko, D.C.R. Espinosa, *E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practises, Resources, Conservation and Recycling*, nr 122, 2017, s. 32–42.

4. Uwarunkowania prawne dotyczące gospodarki elektroodpadami

Głównymi problemami związanymi z unieszkodliwianiem lub odzyskiem odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych są niedociągnięcia techniczne w zakresie ich odbioru, segregacji i recyklingu oraz niewystarczająca świadomość społeczeństwa dotycząca negatywnego wpływu e-odpadów na zdrowie i środowisko. Z tego względu w ostatnich latach gospodarka elektroodpadami jest jednym z priorytetowych działań w Unii Europejskiej. Unijne prawodawstwo dotyczące gospodarki odpadami obejmuje około 30 aktów prawnych, promujących ideę recyklingu celem stopniowej eliminacji wytwarzania odpadów lub wykorzystania ich jako surowców. Zapisy zawarte w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [19] określają docelowy poziom zbiórki elektroodpadów na poziomie 45% sprzedanego sprzętu elektronicznego od 2016 r., natomiast od 2019 r. obowiązywał będzie poziom wynoszący 65% [30]. W przypadku państw o słabiej rozwiniętej infrastrukturze do przetwarzania e-odpadów, w tym również dla Polski, dyrektywa określa niższy poziom zbiórki, rzędu 40% w 2016 r. oraz 65% do roku 2021 [19, 33]. Jest to o tyle istotne, że obecnie w Polsce zbiera się tylko około 30% masy sprzętu wprowadzanego na rynek, w związku z tym realizacja założonych limitów byłaby niezwykle trudna [5].

Polskie prawodawstwo dotyczące gospodarki odpadami urządzeń elektrycznych i elektronicznych obejmuje liczne ustawy i rozporządzenia (tab. 3). Podstawowym aktem prawnym z zakresu gospodarki elektroodpadami jest ustawa z dnia 11 września 2015 r. o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym [21]. Powyższa ustawa reguluje obowiązki podmiotów wprowadzających do obrotu handlowego sprzęt elektryczny i elektroniczny oraz prowadzących działalność w zakresie zbiórki lub przetwarzania e-odpadów. Zgodnie z ustawą cały system gospodarki e-odpadami obejmuje podsystemy [2]:

- ◆ zbiórki, gromadzenia i segregacji wstępnej,
- ◆ demontażu ręcznego i mechanicznego,
- ◆ odzysku, recyklingu i unieszkodliwiania.

Tab. 3. Najważniejsze akty prawne dotyczące gospodarki elektroodpadami

Lp.	Nazwa aktu prawnego	Dziennik Ustaw
1.	Ustawa z dnia 11 września 2015 r. o zużytych sprzęcie elektrycznym i elektronicznym	Dz. U. 2015, poz. 1688
2.	Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach	Dz. U. 2013, poz. 21
3.	Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 21 grudnia 2016 r. w sprawie zasadniczych wymagań dotyczących ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym	Dz. U. 2017, poz. 7
4.	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 grudnia 2009 r. w sprawie rocznych poziomów zbierania zużytych baterii przenośnych i zużytych akumulatorów przenośnych	Dz. U. 2009, nr 215 poz. 1671
5.	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 grudnia 2016 r. w sprawie szczegółowych stawek opłaty produktowej dla grup sprzętu	Dz. U. 2016, nr 0, poz. 2230
6.	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 grudnia 2016 r. w sprawie wzoru zaświadczenia o zużytych sprzęcie	Dz. U. 2016, nr 0 poz. 2186
7.	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 15 grudnia 2016 r. w sprawie zakresu i wzoru rocznego raportu o funkcjonowaniu systemu gospodarki zużytych sprzętem	Dz. U. 2016, nr 0, poz. 2184
8.	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie rocznego audytu zewnętrznego organizacji odzysku sprzętu elektrycznego i elektronicznego oraz zakładu przetwarzania	Dz. U. 2016, nr 0, poz. 2133
9.	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie wzorów wniosków o wpis do rejestru w odniesieniu do wprowadzającego sprzęt i autoryzowanego przedstawiciela oraz sposobu ich przekazywania	Dz. U. 2015, nr 0 poz. 2353

Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie ze wspomnianą Ustawą o zużytych sprzęcie elektrycznym i elektronicznym, na producentach i importerach spoczywa obowiązek zbiórki, odbioru, odzysku i recyklingu wyeksploatowanych urządzeń. Przedsiębiorcy posiadający wpis do rejestru, są zobowiązani do sporządzania sprawozdań dotyczących masy zebranych e-odpadów i przekazywania raportów do GIOS-ii, z uwzględnieniem ilości i rodzaju zebranego sprzętu [21, 28]. Wśród innych obowiązków producentów i wprowadzających do obrotu handlowego urządzenia elektryczne i elektroniczne należy wymienić [2]:

- ◆ informowanie kupujących o kosztach przetwarzania, zbierania, recyklingu i unieszkodliwiania odpadów,
- ◆ rozszerzanie edukacji społecznej w zakresie gospodarki e-odpadami.

Obowiązująca od 1 stycznia 2016 r. nowa ustawa o zużytych sprzęcie elektrycznym i elektronicznym implementuje również szereg zmian w zakresie funkcjonowania gospodarki e-odpadami w stosunku do dotychczas obowiązujących przepisów. Wprowadzający do obrotu urządzenia elektryczne i elektroniczne od 2016 r. są zobowiązani do uzyskania minimalnych rocznych poziomów zbierania zużytego sprzętu nie mniej niż 40% średniorocznej masy urządzeń dostarczanych na rynek. W kolejnych

latach ilość ta będzie ulegać stopniowemu zwiększaniu – do 65% średniorocznej masy wprowadzonego na rynek sprzętu w 2021 r. [28].

Zgodnie z zapisami zawartymi w wymienionej ustawie, od 2018 r. nastąpi zmiana w klasyfikacji sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Dotychczasowa liczba kategorii urządzeń zostanie zmniejszona z 10 do 6, co ma na celu usprawnienie oraz obniżenie kosztów przetwarzania. Dla konsumentów główną zaletą nowej ustawy jest obowiązek nieodpłatnego przyjęcia małogabarytowego zużytego sprzętu pochodzącego z gospodarstw domowych przez sklepy ze sprzętem AGD i RTV o powierzchni powyżej 400 m², bez konieczności zakupu nowego urządzenia. Dotychczas nieodpłatny zwrot zużytego urządzenia był możliwy tylko przy zakupie nowego sprzętu [21].

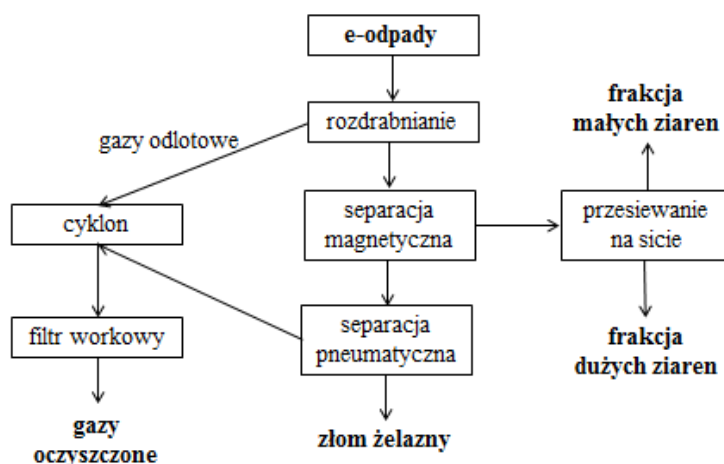
Dodatkowo ustawa zaostrza kary związane z nieprzestrzeganiem zasad postępowania z elektroodpadami. Zgodnie z zapisami zawartymi we wspomnianym akcie prawnym, zwiększono ilość administracyjnych kar pieniężnych z 8 do 45 [28]. Działania mają na celu skuteczniejsze egzekwowanie zarówno od producentów, jak i konsumentów przepisów związanych z prawidłowym postępowaniem z e-odpadami.

5. Technologie recyklingu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego

W gospodarce elektroodpadami niezwykle istotne jest opracowanie prawidłowych działań organizacyjnych, informacyjnych, prawnych oraz technicznych celem odzysku cennych surowców zawartych w złomie elektrycznym i elektronicznym. Zmniejszające się zasoby naturalne oraz potrzeba ograniczenia kosztów ich wydobycia, doprowadziły do rozwoju idei recyklingu w wielu krajach. Realizacja odzysku obejmuje szereg rozwiązań technicznych, takich jak segregacja „u źródła” lub zbieranie podstawowych frakcji [2].

Recykling elektroodpadów odbywa się w różnych regionach świata przy zróżnicowanych poziomach zaawansowania [7]. Do przetworzenia e-odpadów zastosowanie znalazła metoda mechaniczna, bazująca na procesie rozdrabniania odpadów za pomocą strzępiarki (ryc. 3). Na wstępie niezbędne jest wymontowanie baterii i akumulatorów, które nie powinny trafić do strzępienia. W dalszym etapie rozdrobniony materiał poddaje się separacji magnetycznej i pneumatycznej oraz przesiewaniu na sicie. W wyniku separacji magnetycznej odzyskiwany jest złom metali żelaznych, z kolei drobny materiał przesiewa się na sicie i kieruje do składowania. Powstające podczas zastosowanej metody recyklingu gazy odlotowe transportowane są do cyklonów, a następnie do filtrów workowych w celu ich oczyszczenia [9].

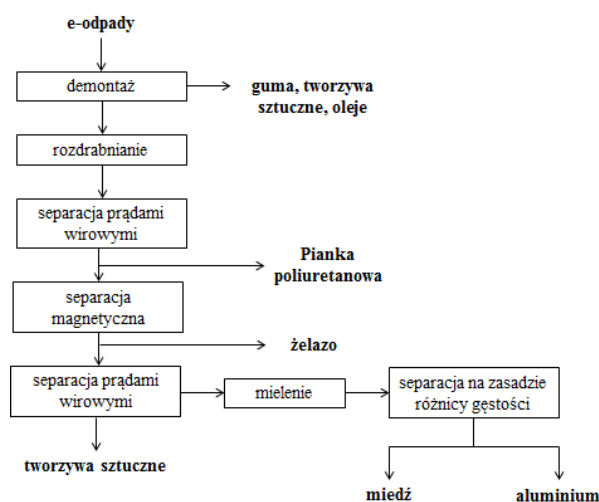
Ryc. 3. Recykling odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych metodą mechaniczną



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: A. Woynarowska, W. Żukowski, *Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych*, *Czasopismo Techniczne Chemia*, z. 16, r. 109, 2012, s. 175–185.

Inna metoda recyklingu, stosowana m.in. w Korei, obejmuje ręczny demontaż urządzeń, rozdrobnienie odpadów oraz separację magnetyczną i przeciwprądową (ryc. 4). Na etapie ręcznego demontażu usuwane są wszystkie kable, obwody drukowane celem ograniczenia emisji toksycznych związków podczas właściwego procesu recyklingu. Zastosowanie separacji z użyciem prądów wirowych polega na wytworzeniu prądów indukujących pole magnetyczne. Efektem zabiegu jest odpychanie metali nieżelaznych przez magnes, z kolei metale żelazne są wychwytywane i zbierane do pojemnika umieszczonego pod separatorami. Na tym etapie z masy odpadów odzyskiwane są: guma, tworzywa sztuczne oraz żelazo, miedź i aluminium [17, 18].

Ryc. 4. Recykling e-odpadów z zastosowaniem prądów wirowych

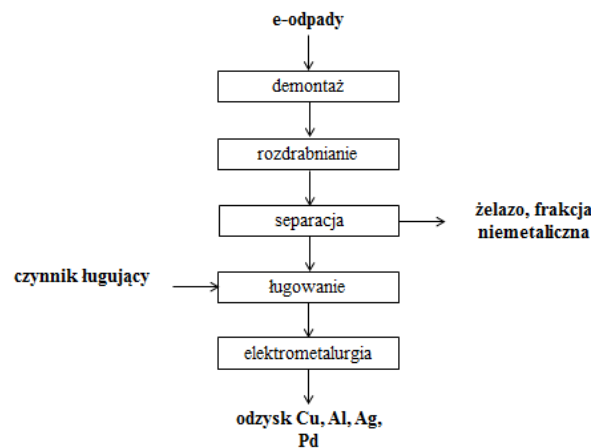


Źródło: Opracowanie własne na podstawie: A. Woynarowska, W. Żukowski, *Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych*, *Czasopismo Techniczne Chemia*, z. 16, r. 109, 2012, s. 175–185.

Na szerszą skalę stosowane są również metody recyklingu oparte na hydrometalurgii oraz kombinacji procesów mechanicznych i hydrometalurgicznych (ryc. 5). W początkowym etapie elektroodpady są demontowane i rozdzielane na następujące frakcje: metale, tworzywa sztuczne, baterie oraz obwody drukowane. Po wstępnej segregacji, składniki zawierające metale są rozdrabniane w celu uzyskania wyższej sprawności kolejnych etapów recyklingu. Następnie rozdrobniony materiał poddawany jest separacji magnetycznej, co pozwala na wydzielenie żelaza oraz frakcji metalicznej i niemetalicznej. Odzyskaną frakcję metaliczną przetwarza się metodą hydrometalurgiczną z zastosowaniem procesu ługowania wodą królewską, tiomocznikiem lub tiosiarczanem. Ostatnią fazą procesu jest bezpośredni odzysk metali za pomocą metod elektrometalurgicznych z użyciem prądu elektrycznego. W ten sposób uzyskuje się m.in. miedź, srebro oraz pallad, które można ponownie wykorzystać do produkcji nowych urządzeń elektrycznych i elektronicznych [17].

Badania laboratoryjne potwierdziły przydatność metod biometalurgicznych w odzysku metali z odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych, przy czym uzyskane rezultaty są zdecydowanie gorsze niż w przypadku innych metod recyklingu. W wymienionym procesie stosowane są bakterie kwasolubne m.in. *Acithiobacillus ferrooxidans*, które odgrywają istotną rolę w tzw. biolugowaniu i przenoszeniu metali z fazy stałej do fazy ciekłej. Mechanizm procesu polega na mineralnej biooksydacji, wskutek czego komórki mikroorganizmów utleniają nierozpuszczalne w wodzie siarczki metali do rozpuszczalnych siarczanów z zastosowaniem elektronów pochodzących bezpośrednio z materiałów [16]. Karwowska i wsp. [3] w swoich badaniach potwierdzili możliwość odzysku metali z urządzeń elektrycznych i elektronicznych na poziomie odpowiednio: 48,5% dla Ni, 53% dla Cu, 48% dla Zn, 93% dla Cd oraz zaledwie 0,5% dla Pb. Ze względu na stosunkowo niską wydajność, proces znajduje się w fazie testów laboratoryjnych i nie doczekał się komercyjnego zastosowania [7].

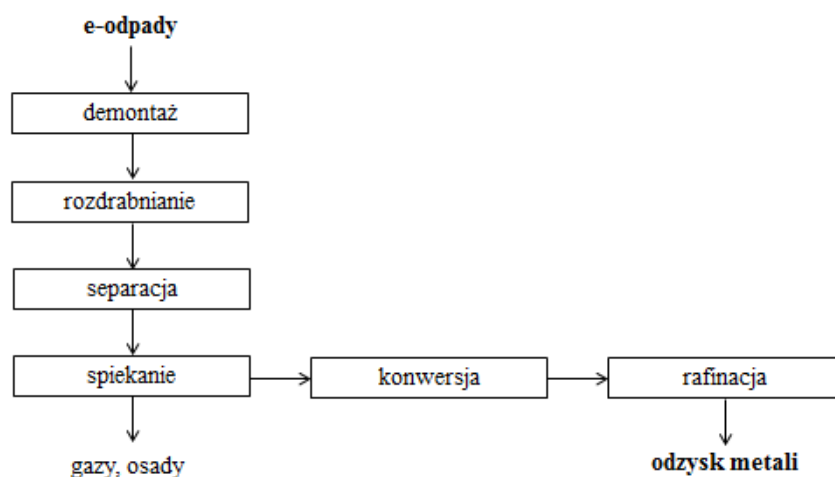
Ryc. 5. Recykling odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych z zastosowaniem metod hydrometalurgicznych



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: A. Woynarowska, W. Żukowski, *Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych*, *Czasopismo Techniczne Chemia*, z. 16, r. 109, 2012, s. 175–185.

Metody pirometalurgiczne bazują na odzysku metali zawartych w e-odpadach poprzez ich transformację w odpowiednio wysokich temperaturach do określonych faz skondensowanych (w tym stopu metalicznego) lub do fazy gazowej z późniejszą kondensacją. Ogólny zarys procesu przedstawiono na rycinie 6, przy czym w praktyce stosowane są różne modyfikacje wymienionej metody. W celu zwiększenia wydajności procesu, odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych są demontowane na części składowe i rozdrabniane z zastosowaniem kruszarek. Następnie, uzyskany materiał poddaje się spiekaniu, konwersji i rafinacji celem otrzymania czystego metalu [7, 13].

Ryc. 6. Recykling odpadów urządzeń elektrycznych i elektronicznych z zastosowaniem metody pirometalurgicznej



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Z. Lingen, X. Zhenming, *A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment*, *Journal of Cleaner Production*, nr 127, 2016, s. 19–36

6. Korzyści wynikające z recyklingu elektroodpadów

Recykling zużytych urządzeń elektrycznych i elektronicznych przynosi korzyści ekologiczne, ekonomiczne oraz społeczne. Badania przeprowadzone przez BullionStreet [23] wykazały, że odzysk złota i srebra z e-odpadów zebranych w miastach w ciągu roku może przynieść oszczędności rzędu 21 miliardów dolarów. Dodatkowo recykling elektroodpadów przyczynia się do rozwoju zarówno globalnego, jak i lokalnego rynku pracy. Według Electronics Take Back Coalition odzysk 10 000 t materiałów pozwala stworzyć 296 lub więcej miejsc pracy [25]. Przykładowo, w Guiyu w Chinach, recykling odpadów pochodzących z sektora informatycznego zapewnił miejsca pracy prawie 100 000 osobom [29].

Rozwój metod recyklingu e-odpadów przyczynia się do redukcji składowania odpadów niebezpiecznych. Chociaż dobrze zarządzane i monitorowane składowiska stanowią tymczasowe rozwiązanie problemu, niemniej jednak w dłuższej perspektywie składowanie e-odpadów może doprowadzić do skażenia gleb. Jest to istotne

zwłaszcza w krajach z ograniczonymi obszarami lądowymi, takich jak np. Japonia. Odpady urządzeń elektrycznych mogą również negatywnie oddziaływać na środowisko wodne [6]. Przykładowo, osady dennie w pobliżu Guiyu w Chinach miały ponad 400–600 razy podwyższone poziomy miedzi, ołowiu, cyny, antymonu, niklu i kadmu [12]. Z tego względu prawidłowa utylizacja e-odpadów jest istotna z punktu widzenia ochrony środowiska. Dodatkowo recykling odpadów elektronicznych zmniejszy ogólny popyt na wydobycie metali, co przyczynia się do obniżenia emisji gazów cieplarnianych i chroni zasoby naturalne. Według Electronics Take Back Coalition produkcja jednego komputera wymaga dostarczenia 240 kg paliw kopalnych, 22 kg substancji chemicznych i 1,5 t wody [29]. W porównaniu do procesów produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego z nowych surowców, technologie recyklingu charakteryzują się również niższą energochłonnością. Przykładowo, recykling 10 kg aluminium pozwala zaoszczędzić 90% energii, jak również zmniejsza emisję CO₂ o około 20 kg i SO₂ o 11 kg [6, 8].

Odpady urządzeń elektrycznych i elektronicznych zawierają blisko 60 różnych substancji, w tym metali ciężkich i związków toksycznych, co może wpływać negatywnie na zdrowie człowieka [26]. Scruggs i wsp. [12] wykazali, że konsumenci mogą być narażeni na działanie niebezpiecznych substancji chemicznych już na etapie używania urządzeń elektronicznych. Kumar i wsp. [6] zbadali również, że niebezpieczne materiały zawarte w e-odpadach wpływają negatywnie na rozwój umysłowy, uszkodzenie nerek i wątroby oraz powodują uwalnianie czynników rakotwórczych. Recykling elektroodpadów jest barierą ograniczającą ich szkodliwy wpływ na zdrowie i życie ludzi oraz środowisko przyrodnicze.

7. Podsumowanie

Produkcja urządzeń elektrycznych i elektronicznych jest jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi gospodarki. Wprowadzanie coraz nowszych i funkcjonalnych modeli skutkuje powstawaniem ogromnych ilości złomu elektrycznego i elektronicznego, który klasyfikuje się do odpadów niebezpiecznych. Corocznie na świecie powstaje blisko 50 mln Mg elektroodpadów, a roczne tempo przyrostu masy generowanych e-odpadów jest ponad 3-krotnie większe niż dla odpadów komunalnych [2].

Wyeksploatowane urządzenia elektryczne i elektroniczne są problemowym odpadem, który nieumiejętnie zagospodarowany stwarza poważne zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi. Obecne w elektroodpadach metale ciężkie oraz substancje toksyczne, jak np. PCB, PBB w przypadku niewłaściwie prowadzonych procesów przeróbki mogą doprowadzić do skażenia gleb oraz zasobów wodnych. Z tego względu gospodarka e-odpadami zarówno w Polsce, jak i w innych państwach jest jednym z priorytetowych działań w zakresie ochrony środowiska.

Gospodarka zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym w Polsce jest stosunkowo nową dziedziną gospodarki odpadami. W latach 70. XX w., gdy na zachodzie Europy funkcjonowały już rozwiązania w zakresie unieszkodliwiania e-odpadów, w Polsce problemu praktycznie nie dostrzegano [2]. Z tego względu, głównym celem

implementowanych w kraju aktów prawnych jest stworzenie prawidłowo funkcjonującego systemu zbiórki i utylizacji elektroodpadów, z uwzględnieniem najlepszych dostępnych technik BAT. Podejmowane działania obejmują zarówno sektor komunalny poprzez propagowanie selektywnej zbiórki, jak i sektor gospodarczy, w tym dostawców i sklepy wprowadzające do obrotu sprzęt [5].

Ograniczone zasoby surowców naturalnych oraz wysokie koszty ich pozyskiwania powodują, że recykling urządzeń elektrycznych i elektronicznych jest uzasadniony ekologicznie i ekonomicznie. Odzyskane materiały można ponownie zastosować do produkcji nowych urządzeń AGD i RTV lub wyrobów o innym przeznaczeniu, np. instrumentów muzycznych czy nawet plomb dentystycznych [17]. Dodatkowo zastosowanie prawidłowych technik recyklingu stwarza szansę rozwoju dla gospodarki poprzez tworzenie nowych miejsc pracy oraz odzysk cennych metali. W związku z powyższym zagospodarowanie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego idealnie wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju, również na obszarach wiejskich.

Bibliografia

1. Gołąbek A., *Odpady elektryczne i elektroniczne – podstawy prawne, bariery i zarządzanie a obowiązki recyklingu*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 10, 2012, s. 30–38.
2. Garlapati, V.K., *E-waste in India and developed countries: management, recycling, business and biotechnological initiatives*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, nr 54, 2016, s. 874–881.
3. Karwowska E., Andrzejewska-Morzuch D., Łebkowska M., Tabernacka A., Wojtkowska M., Telepko A., Konarzewska A., *Bioleaching of metals from printed circuit boards supported with surfactant-producing bacteria*, Journal of Hazardous Materials, nr 264, 2014, s. 203–210.
4. Kaya M., *Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling process*, Waste Management, nr 57, 2016, s. 64–90.
5. Kruczek M., *Model łańcucha logistyki odwrótej zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria: Organizacja i Zarządzanie, z. 60, 2012, s. 165–178.
6. Kumar A., Holuszko M., Espinosa D.C.R., *E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices*, Resources, Conservation and Recycling, nr 122, 2017, s. 32–42.
7. Lingen Z., Zhenming X., *A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment*, Journal of Cleaner Production, nr 127, 2016, s. 19–36.
8. Liu S., *Analysis of electronic waste recycling in The United States and potential application in China* http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/FINAL_Shumeng_Thesis_Dec%202014.pdf (dostęp: 5.06.2017).
9. 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, nr 32, 2012, s. 96–103.
10. Namias, J., *The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions* http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Namias_Thesis07-08-13.pdf (dostęp: 5.06.2017).

11. Schlupe M., Hagelueken C., Kuehr R., Magalini F., Maurer C., Meskers C., Mueller E., Wang F., *Recycling - from e-waste to resources, Sustainable innovation and technology transfer industrial sector studies*, UNEP, Berlin 2009.
12. Scruggs C.E., Nimpuno N., Moore R.B.B., *Improving information flow on chemicals in electronic products and E-waste to minimize negative consequences for health and the environment*, Resources, Conservation and Recycling, nr 113, 2016, s. 149–164.
13. Sobianowska-Turek A., *Odzysk cynku i manganu z baterii Zn-C i Zn-Mn*, Praca doktorska, Wrocław 2009.
14. Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2014 r. Raport Głównego Urzędu Statystycznego, <http://stat.gov.pl/> (dostęp: 20.07.2017).
15. Tansel B., *From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges*, Environmental International, nr 98, 2017, s. 35–45.
16. Watling, H.R., *The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - a review*, Hydrometallurgy, nr 84, 2006, s. 81–108.
17. Woynarowska A., Żukowski W., *Współczesne metody recyklingu odpadów elektronicznych*, Czasopismo Techniczne Chemia, z. 16, r. 109, 2012, s. 175–185.
18. Young-Chul J., *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management in Korea: generation, collection, and recycling systems*, Waste Management Research in Korea, nr 12, 2010, s. 283–294.

Akty prawne

19. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE).
20. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. z 2014 r., poz. 1923).
21. Ustawa z dnia 11 września 2015 r. o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2015 r., poz. 1688).

Źródła internetowe

22. <http://www.akademiaodpadowa.pl/619,a,22-drugie-zycie-komputera-czyli-recyklingelektro niki.htm> (dostęp: 21.07.2017).
23. <http://www.bullionstreet.com/news/electronics-industry-uses-320-tons-of-gold7500-tons-of-silver-annually/2255> (dostęp: 21.07.2017).
24. <https://ekolia.pl/sprzet-elektryczny-i-elektroniczny-definicja/> (dostęp: 21.07.2017).
25. http://www.electronicstakeback.com/wp-content/uploads/Facts_and_Figures_on_EWaste_and_Recycling.pdf (dostęp: 21.07.2017).
26. <http://www.endseurope.com/article/39711/electronic-goods-life-spans-shrinking-study-indicates> (dostęp: 21.07.2017).
27. www.fwie.eco.pl/publikacja/www/WEEE.ppt (dostęp: 21.07.2017).
28. <http://www.gios.gov.pl/pl/aktualnosci/267-najwazniejsze-zmiany-w-ustawie-ozuzytym-sprzecie-elektrycznym-i-elektronicznym> (dostęp: 21.07.2017).
29. <http://www.greenpeace.org/international/PageFiles/25134/recycling-of-electronic-waste.pdf> (dostęp: 21.07.2017).
30. <http://www.lex-pol.pl/2012/08/nowa-dyrektywa-w-sprawie-zuzytego-sprzetuelektrycznego-i-elektronicznego/> (dostęp: 21.07.2017).
31. <http://mashable.com/2014/05/22/electronic-waste/#8N5kCeBrSuqF> (dostęp: 21.07.2017).

32. <http://ptezg.pl/Files/files/zn3/barska.pdf> (dostęp: 21.07.2017).
33. <http://eur-lex.europa.eu> (dostęp: 21.07.2017).