

AMELIA WOYNAROWSKA, WITOLD ŻUKOWSKI\*

## TERMICZNE PRZEKSZTAŁCANIE ZUŻYTEGO SPRZĘTU ELEKTRYCZNEGO I ELEKTRONICZNEGO

---

## INCINERATION OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT

### Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę gospodarki zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym (ZSEE) w Unii Europejskiej i w Polsce. Omówiono regulacje prawne oraz zmiany w zagospodarowaniu tego typu odpadów od momentu przystąpienia Polski do Unii Europejskiej. Przedstawiono również metodę termicznego przekształcania odpadów.

*Słowa kluczowe: zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, ZSEE*

### Abstract

This paper describes problem with wasted electrical and electronic equipment (WEEE) in European Union and Poland. There are showed changes in waste management of WEEE after accession of Poland to European Union. There is also described thermal waste transformation method.

*Keywords: Waste of Electrical and Electronic Equipment, WEEE*

---

\* 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

Szacuje się, że każdy mieszkaniec Unii Europejskiej wytwarza przeciętnie ponad 500 kg odpadów rocznie, z czego ok. 17–20 kg to odpady przemysłu elektrycznego i elektronicznego [1]. Ilość tego typu odpadów ciągle wzrasta i wynosi w Europie od 3% do 5% w stosunku do ogólnej ilości odpadów. Zużyty sprzęt elektryczny i nieprzetworzony elektroniczny oddziałuje negatywnie na ludzkie zdrowie i środowisko. Wynika to z faktu, że w jego składzie zawartych jest szereg metali, w tym metale ciężkie, oraz związki organiczne, które mogą być trwałymi zanieczyszczeniami środowiska. Podstawowym problemem jest to również, że ZSEE ma skład chemiczny bardzo zróżnicowany, dlatego powinno się prowadzić zbieranie i utylizację tego typu odpadów. Z tego też powodu zarządzanie tymi odpadami jest bardzo ważne, a wręcz niezbędne. Niestety świadomość konsumentów jest nadal nie wystarczająca, choć niewątpliwie wzrasta. Zwłaszcza małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego traktowane są nadal przez nich jako odpady komunalne [1].

## 2. Regulacje prawne dotyczące zużytego sprzętu elektrycznego elektronicznego

Podstawowym aktem Unii Europejskiej dotyczącej działania systemów zarządzania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym jest Dyrektywa 2002/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 stycznia 2003 roku.

Głównym celem Dyrektywy 2002/96/WE jest ograniczenie ilości zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych, a ponadto ponowne użycie i recykling, aby zmniejszyć ilość odpadów. Na Państwa Unii Europejskiej nałożono również obowiązek projektowania i produkcji urządzeń elektrycznych i elektronicznych w sposób umożliwiający ich demontaż oraz odzysk. Działania te zostały również wsparte wytycznymi Dyrektywy 2002/95/WE z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym [4].

Zgodnie z Ustawą o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym z dnia 29.07.2005 r. dokonano podziału tych odpadów na 10 grup i wskazano ich najważniejsze rodzaje, co zostało przedstawione w tabeli 1. Ponadto Ustawa o ZSEE wskazuje, które składniki należy usunąć w pierwszej kolejności z tego typu odpadów, a jakie należy przetworzyć, co pokazano w tabeli 2.

Dyrektywa 2002/96/WE wskazała dla każdej z grup zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego wymagane minimalne poziomy odzysku oraz minimalne poziomy ponownego użycia i recyklingu, co zostało przedstawione w tabeli 3.

Tabela 1

## Grupy i ważniejsze rodzaje sprzętu elektrycznego i elektronicznego [10]

Grupa	Rodzaje sprzętu elektrycznego i elektronicznego
<b>Wielkogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego</b>	chłodziarki, zamrażarki, pralki, suszarki do ubrań, zmywarki, urządzenia kuchenne, w tym kuchenki, piece i płyty elektryczne, mikrofalówki, elektryczne urządzenia grzejne, wentylatory elektryczne, urządzenia klimatyzacyjne i sprzęt wentylujący
<b>Małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego</b>	odkurzacze, żelazka, tostery, frytkownice, rozdrabniacze, młynki do kawy, noże elektryczne, urządzenia do strzyżenia, suszenia włosów, szczotkowania golenia, masażu, zegary, wagi, wszelkie małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego
<b>Sprzęt teleinformatyczny i telekomunikacyjny</b>	komputery, laptopy, notebooki, notepady, drukarki, sprzęt kopiujący, kalkulatory, maszyny do pisania, terminale, faksy, telefaksy, telefony, automaty telefoniczne, pozostałe produkty lub sprzęt służący do transmisji głosu, obrazu lub innych informacji za pomocą technologii telekomunikacyjnej
<b>Sprzęt audiowizualny</b>	odbiorniki radiowe i telewizyjne, kamery i sprzed video, sprzęt hi-fi, wzmacniacze dźwięku, instrumenty muzyczne
<b>Sprzęt oświetleniowy</b>	oprawy do lamp fluorescencyjnych, z wyjątkiem opraw stosowanych w gospodarstwach domowych, liniowe i kompaktowe lampy fluorescencyjne, wysokoprężne lampy wyładowcze, ciśnieniowe lampy sodowe i lampy metalohalogenkowe, niskoprężne lampy sodowe, pozostałe urządzenia oświetleniowe, z wyjątkiem żarówek
Narzędzia elektryczne i elektroniczne	wiertarki, piły, maszyny do szycia, urządzenia do skręcania, mielenia, piaskowania, przemiału, piłowania, cięcia, nawiercania, robienia otworów, nabijania, składania, gięcia, narzędzia do nitowania, przyśrubowania, spawania, lutowania, urządzenia do rozpylania, rozprowadzania, rozpraszania, kosiarki do trawy i podobne, pozostałe narzędzia elektryczne i elektroniczne
Zabawki, sprzęt rekreacyjny i sportowy	kolejki elektryczne lub tory wyścigowe, kieszonkowe konsole do gier video, gry video, komputerowo sterowane urządzenia do uprawiania sportów, sprzęt sportowy z elektrycznymi lub elektronicznymi częściami składowymi, automaty uruchamiane monetą, banknotem, żetonem, pozostałe zabawki, sprzęt rekreacyjny i sportowy
Wyroby medyczne	sprzęt do: radioterapii, badań kardiologicznych, dializoterpii, wentylacji płuc; urządzenia medyczne wykorzystujące technikę nuklearną, sprzęt laboratoryjny do diagnostyki in vitro, analizatory, zamrażarki laboratoryjne, testy płodności, pozostałe urządzenia do wykrywania, zapobiegania, monitorowania, leczenia, łagodzenia przebiegu choroby, urazów lub niepełnosprawności
<b>Przyrządy do nadzoru i kontroli</b>	czujniki dymu, regulatory ciepła, termostaty, urządzenia pomiarowe, ważące lub do nastawu używane w gospodarstwie domowym lub jako sprzęt laboratoryjny, pozostałe przyrządy nadzoru i kontroli używane w obiektach i instalacjach przemysłowych
Automaty do wydawania	automaty do wydawania: napojów gorących, butelek lub puszek z zimnymi i gorącymi napojami, produktów stałych, pieniędzy – bankomaty itp.

**Składniki niebezpieczne, materiały lub części składowe, które powinny być przetworzone lub usunięte ze zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [10]**

Do usunięcia w pierwszej kolejności	Do przetworzenia drugiej kolejności
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PCB</li> <li>2. Części składowe zawierające rtęć</li> <li>3. Baterie</li> <li>4. Płytki obwodów drukowanych do telefonów komórkowych oraz inne wyroby, jeżeli powierzchnia płytek &gt; 10 cm<sup>2</sup></li> <li>5. Wkłady drukujące, płynne i proszkowe, a także tonery barwiące</li> <li>6. Tworzywo sztuczne zawierające związki Br zmniejszające palność</li> <li>7. Azbest oraz części składowe zawierające azbest</li> <li>8. Lampy elektronopromieniowe</li> <li>9. Wodorochlorofluorowęglowodory (HCFC), chłoro-fluorowęglowodory (CFC), wodorofluorowęglowodory (HFC) lub węglowodory (HC)</li> <li>10. Gazowe lampy wyładowcze</li> <li>11. Wyświetlacze ciekłokrystaliczne wraz z obudową, o powierzchni &gt; 100 cm<sup>2</sup> oraz podświetlacze z gazowymi lampami wyładowczymi</li> <li>12. Zewnętrzne okablowanie elektryczne</li> <li>13. Części składowe zawierające ogniotrwałe włókna ceramiczne, określone w ustawie z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach chemicznych</li> <li>14. Części składowe zawierające substancje promieniotwórcze, z wyjątkiem części składowych, w przypadku których aktywność całkowita i stężenie promieniotwórcze izotopów promieniotwórczych nie przekraczają wartości określonych jako kryteria zwolnienia z obowiązku uzyskania zezwolenia albo zgłoszenia w przepisach wydanych na podstawie ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe</li> <li>15. Kondensatory elektrolityczne (h &gt; 25 mm, fi &gt; 25 mm)</li> <li>16. Oleje ze sprzężarek.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Z lamp elektronopromieniowych należy usunąć osłonę fluorescencyjną.</li> <li>2. Z urządzeń zawierających gazy zubożające warstwę ozonową lub mające potencjał powodowania globalnego efektu cieplarnianego (GWP) powyżej 15, w tym gazy znajdujące się w piankach oraz obwodach chłodzących – gazy należy właściwie odessać i odpowiednio je oczyścić, zgodnie z ustawą z dnia 20 IV 2004 r. o substancjach zubożających warstwę ozonową.</li> <li>3. Z gazowych lamp wyładowczych należy usunąć rtęć.</li> </ol>

**Docelowe wartości współczynników odzysku i recyklingu dla poszczególnych kategorii produktowych[4]**

<b>Kategoria produktowa</b>	<b>Recykling[%]</b>	<b>Odzysk[%]</b>
Wielkogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego	75	80
Automaty do wydawania	75	80
Urządzenia IT i telekomunikacyjne	65	75
Urządzenia konsumenckie	65	75
Małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego	50	70
Urządzenia oświetleniowe	50	70
Przyrządy elektryczne i elektroniczne	50	70
Zabawki, sprzęt rekreacyjny i sportowy	50	70
Przyrządy do nadzoru i kontroli	50	70
Gazowe lampy wyładowcze	80	–

W opinii Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego (EKES) w państwach Unii Europejskiej pojawia się rocznie 10,3 mln ton nowego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Przewiduje się, że do 2020 roku łączna ilość odpadów powstających ze zużytych urządzeń elektrycznych i elektronicznych osiągnie wartość około 12,3 mln ton. W 2006 r. zebrano w sumie 2 mln ton, a latach 2008–2009 około 3 mln ton. W Unii Europejskiej w roku 2009 więcej zbierano zużytych urządzeń IT i telekomunikacyjnych oraz wielkogabarytowych urządzeń gospodarstwa domowego niż wprowadzano ich na rynek. Natomiast w przypadku ZSEE o małej masie zbierano ich relatywnie mniej niż wprowadzano [4].

Pod względem masy najwięcej zbierano wielkogabarytowego sprzętu gospodarstwa domowego – ok. 59%. Na kolejnych miejscach znajdują się urządzenia konsumenckie ok. 17% łącznej masy zebranego ZSEE oraz urządzenia IT i telekomunikacyjne ok. 13% [4].

W Polsce do 2009 roku nie zrealizowano celu zebrania minimum 4 kg zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego z gospodarstw domowych na mieszkańca w skali roku. Cel ten wynika z dyrektywy o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym i obowiązuje od 1 stycznia 2008 roku. Jednak w kolejnych latach obserwowano znaczący wzrost masy zbieranego zużytego sprzętu, szczególnie pochodzącego z gospodarstw domowych [5].

W 2008 roku recyklingowi poddano 44,5% zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, natomiast ok. 1,3% poddano innym niż recykling procesom odzysku, a nieco ponad 9 ton zużytego sprzętu została ponownie użyta w całości. Pozostała masa przetworzonego sprzętu w większości poddana została unieszkodliwieniu, czyli doprowadzeniu do takiego stanu, który nie stwarza zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi lub dla środowiska. Ponad 1/3 masy odpadów poddanych recyklingowi stanowiły zużyte wielkogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego. Spośród odpadów poddanych procesom odzysku innym niż recykling, największą część (ponad 27%) stanowił zużyty sprzęt teleinformatyczny i telekomunikacyjny [4].

W zakresie odzysku i recyklingu w 2008 roku osiągnięto wymagane poziomy, z wyjątkiem wielkogabarytowych stacjonarnych urządzeń przemysłowych. Jednak już w 2009 roku

uzyskano wymagane poziomy odzysku i recyklingu dla wszystkich grup zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych. W tabeli nr 4 przedstawiono dokładne dane dotyczące ilości zebranego oraz poddane procesom odzysku i recyklingu zebranego zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [5].

Tabela 4

**Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny zebrany oraz poddany procesom odzysku i recyklingu w latach 2006–2009 [5]**

Lata	Zebrano			Poddano [tys. Mg]	
	ogółem [tys. Mg]	w tym z gospodarstw domowych		recykling	odzysk inny niż recykling
		ogółem [tys. Mg]	w przeliczeniu na 1 mieszkańca [kg]		
II połowa 2006	5,031	1,897	0,05	0,457	0,349
2007	27,173	10,280	0,27	15,085	1,538
2008	56,425	36,448	0,96	22,137	0,628
2009	108,792	103,439	2,70	87,884	1,516

W Polsce na dzień 31 grudnia 2009 roku według rejestru przedsiębiorców i organizacji odzysku sprzętu elektrycznego i elektronicznego prowadzonym przez Głównego Inspektora Ochrony Środowiska wpisanych było 3 450 przedsiębiorców prowadzących działalność w zakresie wprowadzania sprzętu oraz 8 399 przedsiębiorców prowadzących działalność w zakresie zbierania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [5].

Natomiast na dzień 30 czerwca 2010 roku w rejestrze GIOŚ zarejestrowane były 145 podmiotów prowadzących działalność w zakresie przetwarzania zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, 65 podmiotów prowadzących działalność w zakresie recyklingu i innych niż recykling procesów odzysku oraz 8 organizacji odzysku zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [5].

### 3. Metody termicznego przekształcania odpadów

Termiczne przekształcanie odpadów jest traktowane jako uzupełniający element zintegrowanego systemu zagospodarowania odpadów oraz jako źródło energii. Zgodnie z dyrektywą 2001/77/WE, która mówi, że spalarnie odpadów mają charakter odnawialnych źródeł energii, nabierają one coraz większego znaczenia na przykład w aspekcie obniżenia kosztów ponoszonych przez mieszkańców na unieszkodliwianie odpadów.

Biorąc pod uwagę to, że przeciętny mieszkaniec dużego polskiego miasta wytwarza dziennie ok. 1 kg odpadów, których wartość opałowa jest w granicy 7–8 MJ/kg, które obecnie w 93% trafiają na składowiska, łatwo wyliczyć, jak duży potencjał energii chemicznej zawartej w odpadach jest utracony. Natomiast same odpady skierowane do nowoczesnych spalarni odpadów lub przetworzone w paliwa i współspalane w zbudowanych w tym celu spalarniach lub przystosowanych instalacji przemysłowych stanowią mogą znaczące źródło

użyteczne dla wytwórców tych odpadów energii, które zgodnie z Ustawą o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 roku ma wszelkie cechy energii odnawialnej [8].

Aby jednak wykorzystać energię zawartą w odpadach, trzeba zbudować w Polsce przynajmniej kilka, a najlepiej wszystkie z 12 zaplanowanych nowoczesnych instalacji odzyskujących energię, gdyż wobec ok. 370 instalacji tego typu pracujących w krajach Unii Europejskiej Polska ma obecnie tylko jedną, niewielką spalarnię. Jest to spalarnia odpadów o wydajności około 40 000 Mg/rok, stanowiąca obok sortowni i kompostowni jedną z instalacji przeróbki odpadów warszawskiego Zakładu Unieszkodliwiania Stałych Odpadów Komunalnych, pracująca od 2001 roku.

W Unii Europejskiej ok. 12% niebezpiecznych odpadów wytwarzanych jest spalanych (rocznie wytwarza się prawie 22 mln ton odpadów niebezpiecznych) [8]. Przykładem może być otwarty w marcu 2010 roku w St. Helen's w Wielkiej Brytanii zakład przerobu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Do centrum przywożone są materiały ze szkół, szpitali oraz różnego rodzaju przedsiębiorstw posiadających zużyty sprzęt elektroniczny. Zakład jest zdolny do przerobu 120 lodówek, 60 telewizorów i 6 ton innych drobnych materiałów elektronicznych na godzinę. Posiada nowoczesne urządzenia zdolne do przerobu sprzętu, który do tej pory trafiał na składowiska z powodu braku aparatury do jego demontażu. Firma ma taką koncepcję budowy zakładów, aby zajmować jak najmniej przestrzeni, być jak najmniej uciążliwym dla środowiska i pochłaniać jak najmniej energii oraz być zdolnym do szybkiego demontażu zakładu i przeniesienia go w inne miejsce [8].

Wyróżnia się kilka rodzajów procesów termicznych, które mogą być wykorzystane w utylizacji odpadów, np.: suszenie, zgazowanie, piroliza i spalanie. Jednak zgodnie z Ustawą o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 roku, rozumie się przez termiczne przekształcanie odpadów spalanie ich przez utlenianie, oraz inne procesy termicznego przekształcania, w tym pirolizę, zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje, które powstają podczas tych procesów są następnie spalane. Z Ustawy więc wynika, że spalanie jest końcową metodą utylizacji odpadów, a inne technologie jak piroliza czy zgazowanie są etapami pośrednimi, które prowadzą do spalania [6].

W zależności od rodzaju odpadów, które podlegają spalaniu oraz od celu prowadzenia procesu wyróżnia się spalanie klasyczne oraz spopielenie.

Celem spalania klasycznego jest uzyskanie energii dla procesów energetycznych bądź przemysłowych, natomiast celem spopielenia jest likwidacja lub zmniejszenie objętości odpadów szkodliwych dla środowiska. Możliwe jest połączenie tych dwóch celów przez energetyczne wykorzystanie odpadów.

W wyniku procesów zgazowania i pirolizy otrzymuje się produkty, które po oczyszczeniu można zagospodarować lub spalić. Jednak celem termicznego przekształcania odpadów jest wykorzystanie ich potencjału energetycznego w sposób technicznie możliwie prosty i mało uciążliwy dla środowiska, dlatego najkorzystniejszym procesem jest spalanie [6].

Typowa spalarnia odpadów jest komorą z rusztem stałym lub obrotowym. Powietrze do palenisk jest podawane najczęściej od dołu. Za paleniskiem znajdują się komory dopalania spalin. Im są większe te komory tym dłuższy jest czas przebywania w nich spalin, lecz tym bardziej rosną koszty inwestycyjne spalarni. Wysoka temperatura spalania (szczególnie w odniesieniu do temperatury tzw. dopalania spalin) oraz dostatecznie długi czas przebywania w komorze dopalającej, są najważniejszymi parametrami pozwalającymi na uzyskanie gazów odlotowych zawierających minimalne ilości zanieczyszczeń, w tym polichlorowanych dioksyn i furanów.

W procesie spalania bardzo istotną częścią instalacji jest układ oczyszczania spalin, ważną rolę odgrywa też właściwa utylizacja stałych produktów procesu. Węzłem oczyszczania spalin z zanieczyszczeń stałych, czyli pyłów są filtry workowe oraz elektrofiltry. Worki są jednak niszczone, gdy temperatura spalin jest bardzo wysoka. Dlatego stosuje się wymienniki ciepła, które wykorzystują energię cieplną spalin lub też bezpośrednio spaliny, przy zbudowaniu odpowiedniej instalacji mogą być medium grzewczym.

Następnie spaliny przechodzą do węzła zasadowego, którego zadaniem jest przede wszystkim likwidacja dwutlenku siarki. Proces wiązania dwutlenku siarki prowadzi się w wysokich kolumnach o różnej konstrukcji i różnej efektywności jakości ich pracy. Najbardziej skutecznym sposobem odsiarczania jest metoda mokra. Polega ona na przepuszczeniu spalin przez wannę, w której znajduje się roztwór wodorotlenku wapnia. Sprawność pochłaniania dwutlenku siarki tą metodą wynosi do 99% i relatywnie powstają najmniejsze ilości gipsu w postaci zawieszinowego szlamu [7].

Podczas procesu wiązania dwutlenku siarki, wiąże się częściowo także dwutlenek węgla, ale także usuwane są ze spalin inne składniki kwaśne oraz w roztworze wiążą się w dużych ilościach metale ciężkie. Aby zwiększyć skuteczność oczyszczania spalin z HCl i HF w części instalacji stosuje się dodatkowy mokry stopień oczyszczania zwany węzłem kwaśnym, w którym czynnikiem aktywnym jest roztwór wodorotlenku sodu.

Kolejnym węzłem, który powinien być obecny w nowoczesnych spalarniach, to węzeł redukcji tlenków azotu NOx (DeNOx). Zanieczyszczenia te są niebezpieczne ze względu na to, że tlenki azotu wraz z innymi składnikami spalin mogą przyczyniać się do powstawania smogu fotochemicznego oraz przechodzą do fazy ciekłej (aerozolu wodnego zawartego w atmosferze) tworząc kwas azotowy (V), który reaguje z metalami i opada wraz z deszczem w postaci soli. Jednak w odpowiednim procesie DeNOx, w zakresie temperatur 850–1000°C następuje redukcja tlenków azotu [7].

### 3.1. Próba termicznej dekompozycji odpadów elektronicznych oraz ekstrakcji metali

Wykonano próby termicznej dekompozycji partii złomu elektronicznego poprzez jej współspalanie w złożu fluidalnym z paliwem wspomagającym oraz ekstrakcji metali w pozostałej, nie spalonej części.

Ponieważ na płytkach elektronicznych elementy metalowe są najczęściej ściśle zespolone z tworzywami sztucznymi i nieprzewodzącymi elementami pełniącymi funkcje izolacyjne i konstrukcyjne, najpierw płytki podzielono na fragmenty o wymiarach liniowych rzędu kilku cm, a następnie wypalano w laboratoryjnym reaktorze fluidyzacyjnym ze złożem piaskowym, który opalany był gazem LPG. Proces prowadzono w zakresie temperatur 850–950°C, a masa złoża fluidalnego wynosiła 300 g. Podczas wypalania kontrolowano poziom tlenu w obszarze reakcji oraz mierzono stężenia składników w spalinach, takich jak CO<sub>2</sub> i CO. Stanowisko eksperymentalne oraz system pomiarowy był wcześniej wielokrotnie wykorzystywany w poprzednich badaniach, związanych ze spalaniem paliw oraz utylizacją odpadów i został szczegółowo omówiony we wcześniejszych pracach [11–20]. Każdorazowo po wprowadzeniu do reaktora partii przetwarzanego materiału obserwowano wzrost stężenia CO<sub>2</sub> i CO w spalinach. Proces wypalania prowadzono, aż stężenia te powróciły do swojej początkowej wartości, co świadczyło o zakończeniu procesów wypalania części organicznych.

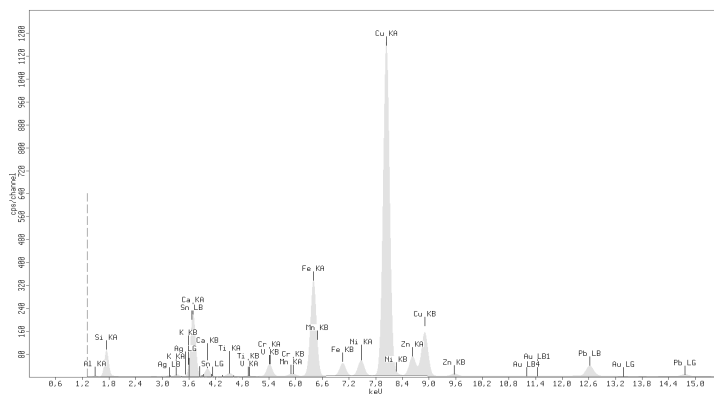
Następnie zebrany materiał po spaleniu, pozbawiony części palnej, który okazał się kruchy, poddano rozdrobnieniu i zmieleniu, do rozmiaru ziaren poniżej 0,2 mm, a następnie etapowej



ekstrakcji. Polegała ona na tym, że materiał kolejno poddano rozтворzeniu w środowisku zasadowym oraz kwaśnym. Próbkę najpierw poddano dwukrotnie ługowaniu roztworem wodorotlenku potasu o stężeniu 30%, a następnie rozтворzeniu przy użyciu kwasu siarkowego o stężeniu 95%.

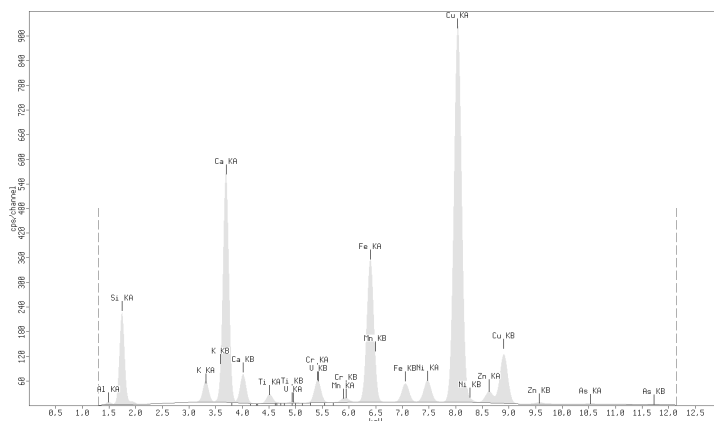
Po każdym etapie ługowania próbki poddane były odsączeniu (na lejku Buchnera lub na lejku kwasoodpornym), wysuszeniu i ważeniu.

Ponadto próbki po spaleniu, po ługowaniu wodorotlenkiem potasu oraz kwasem siarkowym poddano analizie XRF w celu zidentyfikowania głównych składników (pierwiastków) w tym metali, wykorzystywanych w elementach elektronicznych. Analizy te wykonano przy wykorzystaniu Spektrometru PW4025/00 MiniPal i przedstawiono na rysunkach 1–3.



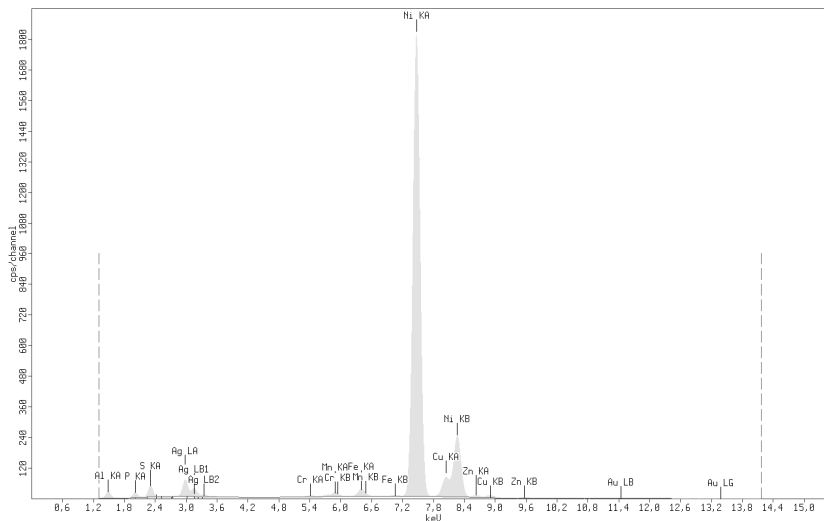
Rys. 1. Widmo energii wtórnych fotonów, uzyskanych metodą XRF próbki stałej po spaleniu w reaktorze fluidalnym

Fig. 1. Energy spectrum of secondary photons, obtained by XRF method after burning in the fluidized reactor



Rys. 2. Widmo energii wtórnych fotonów, uzyskanych metodą XRF matrycy stałej po ługowaniu 30% KOH

Fig. 2. Energy spectrum of secondary photons, obtained by XRF method after extraction of 30% KOH



Rys. 3. Widmo energii wtórnych fotonów, uzyskanych metodą XRF matrycy stałej po procesie ługowania 95%  $H_2SO_4$

Fig. 3. Energy spectrum of secondary photons, obtained by XRF method after extraction of 95%  $H_2SO_4$

Z uzyskanych danych można wywnioskować, iż próbka po spaleniu zawiera największe ilości miedzi, ale także cynę, żelazo, krzem, nikiel, cynk, mangan, chrom, ołów oraz śladowe ilości złota i srebra. Po procesie ługowania 30% roztworem wodorotlenku potasu można zauważyć zmniejszenie zawartości w próbce cynku, manganu, chromu oraz można stwierdzić całkowite rozтворzenie ołowiu i cyny.

Natomiast po ługowaniu za pomocą kwasu siarkowego o stężeniu 95% zaobserwowano usunięcie z próbki większość metali. Głównym metalem, który pozostaje w matrycy jest nikiel (ze względu na jego pasywację), występuje też niewielka zawartość miedzi, srebra oraz śladowe ilości chromu, manganu, żelaza, cynku.

#### 4. Wnioski

Zagospodarowanie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego nie jest rzeczą prostą, ale możliwą do osiągnięcia. Podstawowym problemem jest nadal mała świadomość zagrożenia jakie niosą ze sobą odpady elektryczne i elektroniczne. Zwłaszcza niebezpiecznym zjawiskiem jest składowanie małogabarytowych urządzeń gospodarstwa domowego z odpadami komunalnymi. Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny powinno się zbierać i utylizować selektywnie, ze względu na bardzo zróżnicowany skład chemiczny tego typu odpadów i zagrożenia dla środowiska, które wynikają z jego składowania. Odpowiednia przeróbka odpadów elektronicznych może być też źródłem wiatru wtórnych.

Mimo tego iż ilość powstających odpadów elektronicznych będzie wzrastać, co jest nieuchronne ze względu na nieustanny rozwój techniki, to jak widać na przykładzie takich

krajów jak Wielka Brytania, możliwe jest przetwarzanie odpadów (nawet niebezpiecznych) w sposób nieszkodliwy dla środowiska. W Unii Europejskiej pracuje ok. 370 spalarni odpadów, a w porównaniu w Polsce jest jedna niewielka instalacja utylizująca odpady z wydajnością 40 000 Mg w skali roku. Jednak obecnie na terenie Polski trwają prace budowy 12 spalarni odpadów, które mają się zakończyć około 2014 roku.

Wykonane próby dekompozycji termicznej odpadów oraz roztwarzania ich pozostałości w środowisku zasadowym i kwaśnym pozwalają stwierdzić, iż z wykorzystaniem tej metody można odzyskać ze złomu elektronicznego cenne metale w sposób prosty i skuteczny.

### Literatura

- [1] Divom V., *Zarządzanie elektroodpadami w Bułgarii*, Recykling, 97/2009, s. 25.
- [2] Dyrektywa 2002/96/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE).
- [3] Dyrektywy 2002/95/WE z dnia 27 stycznia 2003 r. w sprawie ograniczenia stosowania niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym.
- [4] *Funkcjonowanie i nieprawidłowości w systemie zarządzania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym (ZSEE) w Polsce*, Instytut Badań Nad Gospodarką Rynkową, Warszawa, marzec 2010.
- [5] Krajowy plan gospodarowania odpadami 2014, z dnia 31.07.2010 r.
- [6] Nadziakiewicz J., Wacławiak K., Stelmach S., *Procesy termiczne utylizacji odpadów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [7] Piecuch T., *Termiczna utylizacja odpadów wdrażać czy nie?*, PAN, Oddział w Gdańsku, Szczecin 1999.
- [8] Pająk T., *Stan zaawansowania oraz ocena projektów*, Przegląd Komunalny 1/2009, dodatek specjalny.
- [9] Ustawa o odpadach z dnia 27.04. 2001 r. Dz.U. z 2010 nr 185, poz. 1243
- [10] Ustawa o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym z dnia 29 lipca 2005 r. Dz.U. z 2005 r., nr 180, poz. 1495.
- [11] Żukowski W., Baron J., Kowarska B., Olek M., Zabagło J., *Termiczna regeneracja ziem bielących w reaktorze fluidyzacyjnym*, Przemysł Chemiczny, 2011 (w druku).
- [12] Zabagło J., Baron J., Kowarska B., Olek M., Żukowski W., *Recykling surowcowy glinu z opakowań wielomateriałowych*, Przemysł Chemiczny, 2011, (w druku).
- [13] Baron J., Olek M., Kowarska B., Zabagło J., Żukowski W., *Redukcja tlenu azotu(II) w strefie nadłożowej reaktora fluidyzacyjnego*, Przemysł Chemiczny, 2010, 89, 4, 290-295.
- [14] Żukowski W., Baron J., Bulewicz E.M., Kowarska B., *An optical method of measuring the temperature in a fluidised bed combustor*, Combustion and Flame, 156, Issue 7, DOI:10.1016/j.combustflame.2009.03.004, 2009, 1445-1452.
- [15] Baron J., Bulewicz E.M., Kandfer S., Pilawska M., Żukowski W., Hayhurst, A.N., *Combustion of Hydrogen in a Bubbling Fluidized Bed*, Combustion and Flame, DOI:10.1016/j.combustflame.2008.11.014, 156, 2009, Issue 5, 975-984.

- [16] Żukowski W., Baron J., Błaszczuk-Pasteczka A., Kandefer, S., Olek, M., *Efekty spalania propanu w inertym i aktywnym chemicznie złożu reaktora fluidyzacyjnego*, Przemysł Chemiczny, 2008, 87, 2, 214-218.
- [18] Żukowski W., Baron J., Zabagło J., Kandefer S., Olek M., *Recovery of aluminum from multi-component packaging using a fluidised bed reactor*, Polish Journal of Chemical Technology, 2008, 10, 4, 40-44.
- [19] Żukowski W., Englot S., Baron J., Kandefer S. Olek M., *Reduction of carbon dioxide emission through sorption in situ using a fluidised bed reactor*, Polish Journal of Chemical Technology, 2008, 10, 4, 45-48.
- [20] Baron J., Bulewicz E.M., Kandefer S., Pilawska M., Żukowski W., Hayhurst, A.N., *The combustion of polymer pellets in a bubbling fluidised bed*, Fuel, 85, DOI:10.1016/j.fuel.2006.05.004, 2006, 2494-2508.