

Valorizacija metala iz pirolizovanog otpada štampanih ploča

NIKOLA B. KILIBARDA, Energoprojekt Hidroinženjering a.d, Beograd

ORCID: 0009-0008-2030-9351

ŽELJKO J. KAMBEROVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0003-0507-5346

JOVANA M. ĐOKIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Hemijskog fakulteta

u Beogradu d.o.o, Beograd

ORCID: 0000-0001-6949-668X

TIHOMIR M. KOVAČEVIĆ, Vojnotehnički institut, Beograd

ORCID: 0000-0001-7386-6831

NIKOLA M. JOVANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog

fakulteta u Beogradu d.o.o, Beograd

ORCID: 0000-0001-8167-9913

Originalni naučni rad

UDC: 628.4.043:628.475

DOI: 10.5937/tehnika2406689K

U ovom radu ispitana je mogućnost valorizacije nemetalične frakcije (NMF), fokusirajući se na izdvajanje metala putem pirolize kako bi se odgovorilo na izazove u reciklaži elektronskog otpada (e-otpada). Karakterizacija realnog uzorka je pokazala da NMF sadrži 3,44 mas.% metala, prvenstveno bakra (80 mas.%), što ukazuje na potencijal za njegovu valorizaciju. Piroliza je optimizovana variranjem temperature (do 800°C) i ambijentalnih uslova (atmosferski u odnosu na vakuum). Optimalna ekstrakcija ulja je postignuta na 700°C pod vakuumom. FTIR analizom je utvrđeno da dobijeno organsko ulje sadrži fenole i halogenizovane arome. Analizom čvrstog ostatka pirolize utvrđeno je koncentrovanje plemenitih metala - srebra (494 g/t) i zlata (56 g/t), što olakšava njihovu dalju valorizaciju. Ovo istraživanje potvrđuje dvostruki potencijal NMF-a za valorizaciju kako organske komponente tako i metala sadržanih u predmetnom materijalu, podržavajući održivo upravljanje materijalima.

Ključne reči: E-otpad, otpadne štampane ploče, nemetalična frakcija, reciklaža, piroliza

1. UVOD

Brzi tehnološki razvoj doveo je do povećane upotrebe električne i elektronske opreme, što je rezultiralo porastom generisanja elektronskog otpada (e-otpad) tri puta brže u poređenju sa komunalnim otpadom. Do 2024. generisano je 62 Mt e-otpada, što predstavlja rast od 82% poslednjih petnaest godina [1-3]. Zbog kompleksnog sastava i prisustva toksičnih mate-

rijala, poput teških metala i polimera, reciklaža e-otpada je izazovna. Ipak, ovaj otpad sadrži i vredne materijale, uključujući osnovne i plemenite metale, čineći ga značajnom sekundarnom sirovinu [4,5]. Trenutno se reciklira samo 17,4% e-otpada, što vodi ka gubitku resursa i negativnim ekološkim posledicama. Zato je ključno razvijati tehnologije koje omogućavaju povrat vrednih metala i smanjenje potrebe za primarnim sirovinama [6-8]. Štampane ploče, neizbežni deo e-opreme a time i e-otpada, sadrže oko 40% metala (osnovnih i plemenitih), te po 30% organskih polimera (plastike) i refraktornih materijala [9-11].

Nakon prikupljanja i manuelne separacije, e-otpad se podvrgava mehaničkom tretmanu usitnjavanja,

Adresa autora: Nikola Kilibarda, Energoprojekt Hidroinženjering ad, Beograd, Bulevar Mihajla Pupina 12
e-mail: nikola.kilibarda88@gmail.com

Rad primljen: 28.11.2024.

Rad prihvaćen: 11.12.2024.

zatim separaciji, pri čemu se obično deli na metaličnu i nemetaličnu frakciju. Ova obrada omogućava efikasniju distribuciju i koncentraciju vrednih komponenti, poput metala, unutar specifičnih frakcija [12]. Nemetalna frakcija (NMF) sadrži keramiku (15% SiO₂, 6% Al₂O₃) i polimere, između ostalih uključujući polietilen (9,9%), polipropilen, poliester i epoksidnu smolu (4,8–8%), poli(vinil)hlorid, teflon (2,4–3%), i najlon (0,9%) ali i metale, čiji sadržaj zavisi od efikasnosti primenjene metode separacije [13,14]. Direktna valorizacija metala klasičnim metalurškim metodama je neefikasna usled prisustva polimera i toksičnih komponenti, poput halogena prisutnih u usporivačima gorenja (BFR) [15].

Najznačajniji pristup reciklaži NMF je reciklaža sirovina, posebno putem pirolize, koja se često sprovodi uz proces dehalogenizacije [16]. Na ovaj način postiže se razlaganje organskih komponenti na povišenim temperaturama (300–900°C) u odsustvu kiseonika [10]. Ovaj pristup troši samo 10% energetskog sadržaja plastike iz e-otpada, sprečava formiranje BFR-a i omogućava generisanje gasova, ulja i koksa, koji se mogu koristiti kao goriva i sirovine u hemijskoj industriji [5, 17]. Kvalitet produkata pirolize zavisi od temperature procesa - visoke temperature (preko 600°C) favorizuju stvaranje gasovitih molekula, dok niske temperature (ispod 400°C) vode ka stvaranju viskozničkih tečnih proizvoda [17,18].

Različite studije bavile su se pirolizom u cilju daljeg iskorišćenja dobijenog organskog ulja [19-21]. Uticaj pirolize i dodatno prečišćavanje proizvoda mikrotalasno potpomognutom pirolizom bile su takođe tema istraživanja [22]. Takođe, katalitička piroliza bila je predmet istraživanja [23, 24]. Diaz i saradnici ispitivali su uticaj temperature (do 800°C) na pirolizu lake frakcije šreder granulata koristeći diskontinuirane i kontinuirane procese, i utvrdili da kontinuirana piroliza dovodi do efikasnije degradacije organskih komponenti i koncentrovanja metala u ostatku. Međutim, reciklaža NMF fokusira se na valorizaciju organskog ulja a uglavnom zanemaruje mogućnost valorizacije metala [10].

Cilj ovog rada je ispitivanje mogućnosti valorizacije metala NMF otpadnih štampanih ploča, i to kroz sveobuhvatnu karakterizaciju realnog uzorka, optimizaciju procesa pirolize i valorizaciju bakra i plemenitih metala iz predmetnog materijala.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Materijal

U ovom radu korišćen je realan uzorak NMF, dostavljen od strane lokalnog reciklažnog centra. Materijal je dobijen mehaničkim tretmanom e-otpada,

nakon primarnog usitnjavanja u mlinu sa lancima opremljenog magnetnim separatorom, a zatim sekundarno usitnjenim u šrederu sa rotirajućim noževima (uređaji Mewa cross-flow QZ i Meccanoplastica). Hemikalije korišćene u laboratorijskim eksperimentima bile su p.a. (pro analysi) sertifikovane.

Sva ispitivanja sprovedena su na reprezentativnom uzorku NMF, izvođenjem procedure uzorkovanja metodom sistemske mreže (ISO 10381- 1:2002 – Anex C4).

Analitičke i eksperimentalne metode

Fizička karakterizacija uzorka obuhvatila je određivanje sadržaja vlage (Mettler UNE 500, ISO 11465:1993), magnetičnih materijala (trostepena magnetna separacija prevlačenjem permanentnog magneta preko ravne površine slobodno nasutog uzorka poznate mase), granulometrijskog sastava (Retsch Vibratory Sieve Shaker AS 200, opremljen standardnim setom sita veličine otvora od 36 µm do 4 mm, ISO 3310-1) i nasipne gustine (ASTM B527). Ispitivanja su rađena u triplicatima.

Hemijska karakterizacija urađena je XRF metodom (X-ray fluorescencespectrometry, Thermo Scientific Niton XL-3t), kalibrisanog za rad u odgovarajućem modu za analizu plastike. Uzorak je za analizu pripremljen kompaktiranjem polaznog materijala korišćenjem jednoosne hidraulične prese.

Distribucija bakra, po prethodno izdvojenim granulometrijskim frakcijama, određena je spektrofotometrijski (LLG Labware) nakon rastvaranja po 50,00 g uzorka u vrućem 20 vol.% rastvoru HNO₃ u trajanju od 90 min.

Optimizaciji procesa pirolize NMF prethodilo je određivanje uticaja temperature na generisanje destilata (organskog ulja). Testovi su vršeni u cevastom reaktoru, u inertnoj atmosferi argona, u temperaturnom intervalu 400-800°C i trajanju od 60 min.

Energetski potencijal NMF uzorka određen je postupkom pirolize na atmosferskom pritisku (NMF_P_atm) i pod vakuumom (NMF_P_vcm; 10±2 kPa). Oba testa izvršena su upotrebom standardne opreme za destilaciju organskih supstanci a koja se sastoji od redne veze reakcionog balona, kondenzatora za hlađenje gasova, prihvatnog suda kondenzovanih organskih ulja i sistema ispiralica (10 vol.% rastvori NaOH i H₂SO₄). Proces je izvođen zagrevanjem reakcionog balona ispunjenog poznatom masom uzorka na temperaturu od 700°C.

Efikasnost procesa pirolize određena je materijalnim bilansom i kvalitativnom analizom izdvojenih frakcija destilata nakon pirolize (organskog ulja). Analiza funkcionalnih grupa destilata urađena je FTIR metodom (Fourier transfer infrared spectroscopy,

Thermo Scientific Nicolet 6700). Spektri su snimani u opsegu 4000 do 500 cm^{-1} i obrađeni primenom OMNIC softverske baze.

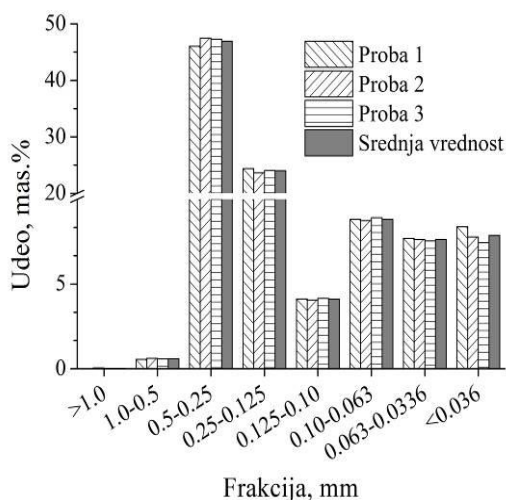
Sadržaj plemenitih metala u ostatku NMF nakon pirolize pod optimalnim uslovima određen je metodom modifikovane kupelacije, a u cilju ispitivanja mogućnosti valorizacije metala sadržanih u predmetnom materijalu. Postupak je vršen dvostepeno. U prvom stupnju, urađeno je kolektovanje svih metala sadržanih u polaznom materijalu u olovu kao metalu kolektoru (u elektrootpornoj peći, pri redukcionim uslovima, i temperaturnom režimu 900°C/20 min, zatim 1000°C/20 min). Po završetku topljenja, rastop olova sa kolektovanim metalima izlivan je u kokile odgovarajućih dimenzija. U drugom stupnju, prethodno dobijena olovna plomba žarena je u specijalnim posudama (kupelama) na 900-950°C do dobijanja legure plemenitih metala (*Dore* legura), koja je analizirana XRF metodom (mod kalibrisan za analizu metala).

3. DISKUSIJA REZULTATA

Fizičko-hemijska karakterizacija

Na osnovu analize triplikata uzorka, utvrđeno je da sadržaj vlage u ispitivanom materijalu iznosi 0,72 mas.%. Određen sadržaj magnetičnih materijala u ispitivanom uzorku iznosio je 1,92 mas.%, Zapaženo je da su u izdvojenom materijalu, pored fino usitnjenih čestica metala, prisutne i čestice nemetalnih karakteristika kao posledica njihovog fizičkog transfera zajedno sa magnetičnim komponentama.

Ispitivanjem granulometrijskog sastava triplikata uzorka, utvrđeno je da u predmetnom materijalu, sa preko 70 mas.% u ukupnom sastavu, dominiraju čestice čija veličina iznosi između 0,125-0,5 mm, i to frakcija 0,25-0,5 mm (preko 46 mas.%) i frakcija 0,125-0,25 mm (preko 24 mas.%) (slika 1).



Slika 1 - Granulometrijski sastav ispitivanog uzorka

Nasipna gustina polaznog NMF uzorka iznosi 561 kg/m^3 , dok se nasipne gustine frakcija dobijenih granulometrijskom analizom, kreću u rasponu od 415 do 659 kg/m^3 , pri čemu vrednost nasipne gustine raste sa smanjenjem veličine čestica izdvojene frakcije.

Hemijskom karakterizacijom NMF uzorka utvrđeno je da ukupan sadržaj metala u predmetnom materijalu iznosi 3,44 mas.%. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata, utvrđeno je da u ukupnom sadržaju metala, dominira Cu sa gotovo 80 mas.% (tabela 1).

Tabela 1. Hemijski sastav NMF uzorka

Metali	Sadržaj (mas.%)
Cu	2,72
Fe	0,36
Zn	0,09
Pb	0,08
Ni	0,09
Cr	0,02
Sb	0,06
Zr	0,01
Mn	0,01
BAL*	96,56

*BAL - nemetalčno

Rezultati distribucije bakra (tabela 2) pokazuju da u predmetnom materijalu ne dolazi do značajnijeg koncentrisanja bakra po frakcijama, i da je njegov sadržaj relativno ujednačeno raspodeljen. Posebno posmatrajući rezultate sadržaja bakra, odnosno utvrđenu činjenicu da frakcije sa nižom nasipnom gustinom odlikuje viši sadržaj bakra, frakcije 0,5>F>0,25 mm i 0,25>F>0,125 mm, u frakcijama F<0,125 mm se može očekivati povećan sadržaj staklo-keramičkih materijala kao nosioca više nasipne gustine.

Tabela 2. Distribucija bakra

Frakcija, mm	Sadržaj Cu u frakciji, mas.%	Distribucija Cu, mas.%
1,0-0,5	0,45	0,18
0,5-0,25	0,84	23,17
0,25-0,125	2,30	28,98
0,125-0,10	5,31	10,27
0,10-0,063	4,62	19,44
0,063-0,0336	3,41	7,48
<0,036	2,58	10,48

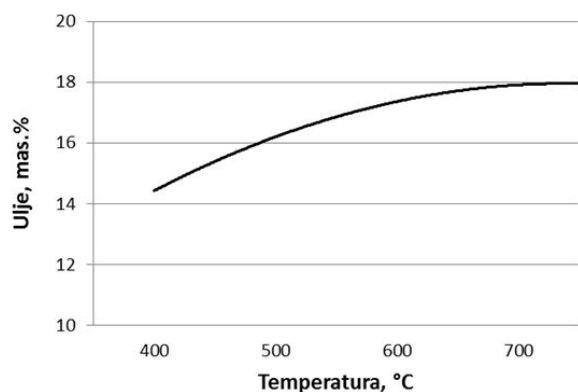
Ukupan sadržaj bakra, na osnovu distribucije, utvrđen je računski i rezultat ne odstupa značajno od vrednosti utvrđene XRF metodom: 2,79 mas.%

odnosno 2,72 mas.%, redom, dajući srednju vrednost od 2,76 mas.% Cu u predmetnom materijalu.

Energetski potencijal

Ispitivanjem uticaja temperature na sadržaj dobijenog organskog ulja, koje je sakupljeno u zoni hlađenja cevastog reaktora, utvrđeno je da temperatura ima značaj uticaj na generisanje ulja i da se plato dostiže na temperature od 700°C (slika 2). Daljim povećanjem procesne temperature, nije zabeleženo povećanje udela izdvajanja ulja, te je ova temperatura definisana kao optimalna za dalje eksperimente optimizacije procesa pirolize.

Ispitivanjem uticaja atmosferskih uslova na proces pirolize NMF utvrđeno je da po dostizanju procesne temperature dolazi do degradacije organskih smola i intenzivnog izdvajanja gasova a potom i kondenzacije i izdvajanja tamno braon tečnosti u prihvatnom sudu. Kod oba testa identifikacija kraja procesa vršena je po prestanku izdvajanja gasova, tj. prestanka kondenzacije i izdvajanja mehurova gasova u ispiralicama.



Slika 2 - Udeo izdvojenog ulja u zavisnosti od temperature

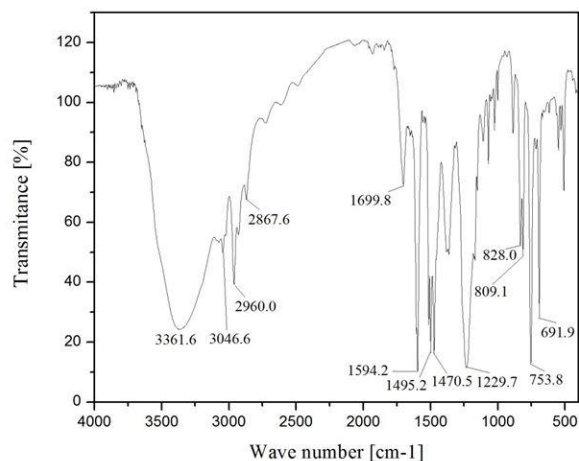
Rezultati izračunatog masenog bilansa (tabela 3) pokazali su da se izvođenjem procesa u vakuumu (proba označena kao NMF_P_vcm) generišu veće količine organskog ulja. Ipak, dobijena količina ulja ukazuje da je efikasnost procesa na relativno niskom nivou, koji iznosi oko 50-60%.

Tabela 3. Maseni bilans pirolize oba testa

Produkti	Proba 1 (mas.%)	Proba 2 (mas.%)
Čvrsti ostatak	77,30	75,80
Organsko ulje	18,30	20,20
Gasovi	4,40	4,00

Kvalitativna analiza organskog ulja dobijenog pirolizom pokazala je da se generišu ulja koja predstavljaju smešu organskih jedinjenja, FTIR spektri uzoraka NMF_P_atm i NMF_P_vcm su identični, te je na slici 3 prikazan spektar samo jednog uzorka.

Na slici se uočava široka traka na 3.361 cm⁻¹ koja predstavlja razvlačenje O-H veze u fenolima. Mali pik na 3.046 cm⁻¹ se vezuje za razvlačenje C-H veze u benzenovom prstenu u aromatičnim jedinjenjima. Dva pika na 2.960 i 2.867 cm⁻¹ predstavljaju C-H vibracije rezvlačenja u metil (-CH₃) i metilenskim (-CH₂-) grupama. Na 1.594 i 1.495 cm⁻¹ se primećuju vibracije rastezanja C=C veza u aromatičnom prstenu. Osim toga, u intervalu 650-900 cm⁻¹ se primećuju pikovi vezani za mono i policiklične i supstituisane (halogenovane) aromatične grupe. Pik na 1.229 cm⁻¹ se uvek vezuje za prisustvo fenola u ispitivanom uzorku.



Slika 3 - FTIR spektar ulja nastalog pirolizom NMF_P_vcm uzorka

Na osnovu kvalitativne analize dobijenih organskih ulja FTIR analizom, utvrđeno je da oba dobijena ulja karakteriše identičan sastav, a koji se opisuje kao smeša fenola i supstituisanih fenola, sa primesama monocikličnih, policikličnih i supstituisanih (halogenovanih) aromatičnih grupa.

Valorizacija metala

Čvrsti ostatak nakon pirolize uzorka pod oznakom NMF_P_vcm korišćen je za ispitivanje potencijala valorizacije plemenitih metala. Rezultati modifikovane kupelacije, odnosno sadržaj plemenitih metala u odnosu na polaznu masu uzorka, prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. Sadržaj plemenitih metala u ispitivanom materijalu

Proba	Ag (g/t)	Au* (g/t)	Pd (g/t)
I	633	62	0
II	582	59	8
III	268	48	2
Sr. vrednost	494	56	3

*sadržaj Au i PGM

Na osnovu prikazanih rezultata, uočljivo je da predmetni materijal karakteriše visok sadržaj pleme-

nitih metala Ag (494 g/t) i Au (56 g/t) dok je sadržaj Pd detektovan na relativno niskom nivou (3 g/t).

4. ZAKLJUČAK

Zaključci sprovedenih ispitivanja ukazuju na značajne potencijale nemetalične frakcije (NMF) e-otpada za reciklažu, kako organskog ulja, tako i metala. Analiza hemijskog sastava pokazala da metali čine 3,44 mas.% NMF-a, od čega je gotovo 80 mas.% čini bakar. Korelacija između granulometrijskog sastava, nasipne gustine i distribucije bakra po frakcijama ukazala je na to da se bakar ne koncentriše u specifičnim frakcijama. Rezultati pirolize, na optimalnoj temperaturi od 700°C, pokazali su da vakuumski uslovi pogoduju izdvajanju organskog ulja, ali ne utiču značajno na njegov sastav, koga karakterišu fenoli, supstituisani fenoli i halogenovane aromatične grupe. U čvrstom ostatku pirolize dolazi do koncentrovanja metala i može biti iskorišćen za dalju valorizaciju, naročito bakra i plemenitih metala, poput srebra (494 g/t) i zlata (56 g/t).

Ovim istraživanjem je pokazano da nemetalična frakcija e-otpada, osim za valorizaciju organskog ulja, ima odličan potencijal za reciklažu metala sadržanih u NMF, što je u skladu sa ciljevima održivog upravljanja materijalima.

5. ZAHVALNICA

Ovaj rad podržan je od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, Republika Srbija (br. Ugovora: 451-03-66/2024-03/200288, 451-03-65/2024-03/200135, i 451-03-66/2024-03/200287).

Zahvaljujemo i saradnicima iz privrede (Spectra Media doo Zagreb) koji su, za ovo istraživanje, obezbedili uzorke i opremu za rad.

LITERATURA

- [1] K. Liu, Q. Tan, J. Yu, M. Wang, *A global perspective on e-waste recycling*, <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100028>, 2023.
- [2] C. P. Baldé, V. Forti, V. Gray, R. Kuehr, P. Stegmann *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*, 2017
- [3] J. S. Mary, T. Meenambal, *Inventorisation of E-Waste and Developing a Policy - Bulk Consumer Perspective*, *Procedia Environmental Sciences* 35, 643–655, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.058>, 2016
- [4] Y. Ryan-Fogarty, C. P. Baldé, M. Wagner, C. Fitzpatrick, *Uncaptured mercury lost to the environment from waste electrical and electronic equipment (WEEE) in scrap metal and municipal wastes*, *Resources, Conservation and Recycling*, 191, 106881, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106881>, 2023.
- [5] T. Yang, Z. Xu, J. Wen, L. Yang, *Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Hydrometallurgy*, 97, 29-32, <https://doi.org/10.1016/j.hydro-met.-2008.12.011>, 2009.
- [6] N. M. Franz, C. L. Silva, *Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE): desafio global e contemporâneo às cadeias produtivas e ao ambiente urbano*, *Gestão & Produção*, 29, e6621, <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e6621>, 2021
- [7] M. O. Caetano, L. G. D. Leon, D. W. Padilha, L. P. Gomes, *Análises de risco na operação de usinas de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (REEE)*, *Gestão & Produção*, 26(2), 26, <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x3018-19>, 2019.
- [8] V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr, G. Bel, *The global e-waste monitor 2020, Bonn: United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA)*, 2020.
- [9] I. McLellan, B. McMahon, J. McNulty, J. Miller, E. Viza, *Recycling Plastics from WEEE: A Review of the Environmental and Human Health Challenges Associated with Brominated Flame Retardants*, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 766, <https://doi.org/10.3390/ijerph19-20766>, 2022.
- [10] F. Diaz, D. Latacz, B. Friedrich, *Enabling the recycling of metals from the shredder light fraction derived from waste of electrical and electronic equipment via continuous pyrolysis process*, *Waste Management*, 172, 335-346, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.001>, 2023.
- [11] M. Ueberschaar, J. Geiping, M. Zamzow, S. Flamme, V. S. Rotter, *Assessment of element-specific recycling efficiency in WEEE pre-processing*, *Resources, Conservation and Recycling*, 124, 25-41, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.006>, 2017
- [12] A. Marra, A. Cesaro, V. Belgiorno, *Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments*, *Journal of Cleaner Production*, 186, 490-498, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.112>, 2018.
- [13] S.A. Shuey, E. E. Vildal, P. R. Taylor, *Pyrometallurgical Processing of Electronic Waste*, SME Annual Meeting, St. Louis, 2006.
- [14] D. S. Achillas, E. V. Antonakou, *Chemical and Thermochemical Recycling of Polymers from Waste Electrical and Electronic Equipment*, *Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques*, <https://doi.org/10.5772/59960>, 2015

- [15] J. Wood, R. Matusiewicz, M.A. Reuter *Secondary copper processing using Outotec Ausmelt TSL technology. METPLANT 2011 - Metallurgical Plant Design and Operating Strategies*, Perth, Australia, 2011.
- [16] X. Yang, L. Sun, J. Xiang, S. Hu, S. Su, Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review, *Waste Management* 33, 462–473, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.025>, 2013.
- [17] B. Ghosh, M. K. Ghosh, P. Parhi, P. S. Mukherjee, B. K. Mishra, Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status, *Journal of Cleaner Production*, 94, 5-9, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024>, 2015.
- [18] A. Buekens, *Introduction to feedstock recycling of plastics*, Edditors: J. Scheirs, W. Kaminsky, Wiley, Chichester, 3–42, <https://doi.org/10.1002/04700-21543.ch1>, 2006.
- [19] I. de Marco, B. M. Caballero, M. J. Chomón, M. F. Laresgoiti, A. Torres, G. Fernández, S. Arnaiz, Pyrolysis of electrical and electronic wastes, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 179-183, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.03.011>, 2008.
- [20] D.V. Suriapparao, S. P. Batchu, S. Jayasurya, R. Vinu, *Selective production of phenolics from waste printed circuit boards via microwave assisted pyrolysis*, *Journal of Cleaner Production*, 197(1), 525-533, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.203>, 2018.
- [21] C. H. Ng, A. Salmiaton, H. Hizam, Catalytic Pyrolysis and a Pyrolysis Kinetic Study of Shredded Printed Circuit Board for Fuel Recovery, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 9(3), 224-240, <https://doi.org/10.9767/bcrec.9.3.7148.224-240>, 2014.
- [22] A. Risco, D. Sucunza, S. González-Egido, Chemical recovery of waste electrical and electronic equipment by microwave-assisted pyrolysis: A review, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 195, 105323, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105323>, 2021.
- [23] C. Santella, L. Cafiero, D. De Angelis, F. La Marca, R. Tuffi, S. V. Cipriotti, Thermal and catalytic pyrolysis of a mixture of plastics from small waste electrical and electronic equipment (WEEE), *Waste Management*, 54, 143-152, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.005>, 2016.
- [24] S. Gulshan, H. Shafaghat, H. Yang, P. Evangelopoulos, W. Yang, Performance analysis and production of aromatics for ex situ catalytic pyrolysis of engineered WEEE, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 179, 106510, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106510>, 2014.

SUMMARY

METALS VALORIZATION FROM PYROLYZED WASTE PCBS

This paper examines the potential for valorizing the non-metallic fraction (NMF) of e-waste, focusing on metal recovery through pyrolysis to address challenges in electronic waste recycling. Characterization of a real sample showed that NMF contains 3.44 wt.% metals, primarily copper (80 wt.%), indicating potential for its valorization. Pyrolysis was optimized by varying temperature (up to 800°C) and atmospheric conditions (ambient vs. vacuum). The optimal oil extraction achieved at 700°C under vacuum. FTIR analysis identified phenols and halogenated aromatics in the generated oil. The pyrolyzed residue showed high concentrations of silver (494 g/t) and gold (56 g/t), enabling their further valorization. This research confirms NMF's dual potential for valorizing both organic and metal content, supporting sustainable material management.

Key Words: E-waste, printed circuit boards, non-metallic fraction, recycling, pyrolysis