



# Metal recovering through recycling of printed circuit boards from computer devices using tabling and magnetic concentration methods

Tiara Triana<sup>a,1</sup>, Soesaptri Oediyani<sup>a</sup>, Adjie Pradana<sup>a</sup>, Zuhraanis Syaifara<sup>a</sup> dan Dewi Kusumaningtyas<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departement of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Jenderal Sudirman KM, 03, Cilegon City 42435, Indonesia

<sup>1</sup>E-mail: [tiara\\_triana@untirta.ac.id](mailto:tiara_triana@untirta.ac.id)

## ARTICLE INFO

### Article history:

Submitted 01 October 2022

Received 02 October 2023

Received in revised form 24 October 2022

Accepted 11 June 2023

Available online on 30 June 2023

### Keywords:

e-waste, gravity concentration, shaking table, PCB.

### Kata kunci:

e-waste, konsentrasi gravitasi, meja goyang, PCB.

## ABSTRACT

The increasing human need for technology can have a negative impact on people's lifestyles which are becoming more consumptive. This causes the amount of electronic waste or e-waste to increase rapidly. Currently Printed Circuit Board is one of the wastes in e-waste which in 500 thousand tons of PCB contains around 150-200 thousand tons of metal. These metals are Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Ni, Mn, Pd, and Fe. The metal contained in the PCB can be used as a secondary resource which can be further processed to produce valuable metals. The purpose of this research is to determine the particle size and prove whether the separation method is not effective in separating metals such as Cu and Ag from other metals. Based on XRF analysis to effectively separate Cu, Ag, and Au metals can use a particle size of 150 $\mu$ m with a Cu content of 78.673% and a particle size of 250 $\mu$ m with an Ag content of 0.083%. Separation is not effective to be carried out on PCB waste, this is because in the application of 1x magnetic separation, the Cu content is 80.51%. However, the type separation is less effective for the extraction of Ag metal. In separation using a shake table alone, the highest Ag content was obtained at 0.085%.

## ABSTRAK

Kebutuhan manusia yang semakin meningkat akan teknologi dapat menyebabkan dampak negatif terhadap pola hidup masyarakat yang menjadi lebih konsumtif. Hal tersebut menyebabkan jumlah limbah elektronik atau e-waste meningkat dengan pesat. Saat ini *Printed Circuit Board* merupakan salah satu limbah pada e-waste yang dalam 500rb ton PCB mengandung sekitar 150-200rb ton logam. Logam tersebut seperti Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Ni, Mn, Pd, dan Fe. Logam yang terdapat didalam PCB dapat dijadikan sebagai *secondary resource* yang dapat diolah lebih lanjut untuk menghasilkan logam berharga. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan ukuran partikel yang efektif dan membuktikan apakah metode pemisahan magnetik efektif terhadap pemisahan logam berharga seperti Cu dan Ag dari logam lainnya. Berdasarkan hasil analisis XRF untuk memisahkan logam Cu, Ag, dan Au yang efektif dapat menggunakan ukuran partikel 150 $\mu$ m dengan kadar Cu sebesar 78,673% dan ukuran partikel 250 $\mu$ m dengan kadar Ag sebesar 0,083%. Pemisahan magnetik efektif untuk dilakukan pada limbah PCB, hal tersebut dikarenakan pada pengaplikasian pemisahan magnetik 1x didapatkan kadar Cu sebesar 80,51%. Namun, pemisahan magnetik kurang efektif untuk dilakukan pada pengambilan logam Ag. Pada pemisahan menggunakan *shaking table* saja didapatkan kadar Ag tertinggi yaitu 0,085%

Available online at <http://dx.doi.org/10.36055/tjst.v19i1.17511>

## 1. Pendahuluan

Pada saat ini, penggunaan teknologi tidak bisa dilepaskan dari kehidupan manusia. Kemajuan teknologi dapat memudahkan manusia dalam beraktivitas. Dibalik hal tersebut, kemajuan teknologi tersebut juga berdampak negatif terhadap pola hidup masyarakat yang menjadi lebih konsumtif yang menyebabkan jumlah limbah elektronik atau e-waste dengan pesat. Sampah elektronik adalah limbah yang berasal dari peralatan elektrik dan elektronik (*Wastes of Electric and Electrical Equipments / WEEE*) yang telah rusak, bekas, dan tidak dipakai lagi oleh pemiliknya [1]. Berdasarkan laporan *Global E-Waste Monitor* pada 2020 yang dirilis Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), jumlah sampah elektronik pada tahun 2019 mencapai 53 juta ton [2]. Pada tahun



2030, PBB memprediksi jumlah sampah elektronik akan mencapai 74 juta ton dan akan terus meningkat menjadi 120 juta ton pada tahun 2050. Sebanyak 17,4% dari limbah elektronik yang mengandung campuran zat berbahaya dan bahan berharga ini yang dikumpulkan, diolah, dan didaur ulang dengan benar. Di Indonesia pada tahun 2021, timbunan sampah elektronik mencapai 2 juta ton [3]. Pulau Jawa berkontribusi hingga 56% dari generasi limbah elektronik. Di Jakarta *recycling rate* dari sampah elektronik hanya sebesar 2% sebagai ibu kota negara [3]. Limbah elektronik yang masuk ke lingkungan, akan mengakibatkan asidifikasi tanah yang dapat merusak tanah. Logam berat yang terkandung dalam barang elektronik dapat berakibat buruk pada kesehatan manusia. Limbah ini dapat menyebabkan kanker (efek karsinogenik), kerusakan jantung, hati dan limpa, otak kronis, bronkhitis, bahkan potensi merusak DNA (efek mutagenik dan teratogenik) [4].

Pada WEEE terdapat peralatan listrik dan elektronik seperti televisi, komputer, ponsel dan laptop yang terdapat *Printed Circuit Boards* (PCB). Dalam PCB mengandung logam Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Ni, Mn, Pd, dan Fe yang termasuk logam yang langka. Logam-logam tersebut memiliki *life extancy* selama antara 20 dan 40 tahun dan bahkan lebih dari 40 tahun dapat dikatakan langka [5]. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan pengolahan dan pemanfaatan kembali logam yang terdapat di produk – produk yang sudah menjadi sampah elektronik. Saat ini limbah PCB merupakan salah satu limbah elektronik yang paling banyak dihasilkan. Dalam 500 ribu ton limbah PCB mengandung sekitar 150 ribu hingga 200 ribu ton logam. Kandungan minimum emas sebesar 40 ton emas dalam 500.000 ton limbah PCB [6].

Pengolahan PCB harus melalui proses pemisahan untuk memastikan logam berharga sudah terpisah dari bagian yang tidak berharga seperti pecahan plastik dan keramik). Secara khusus metode pemisahan secara mekanis terdiri dari metode gravitasi, elektrostatis, magnetik, dan flotasi. Pemisahan gravitasi adalah teknologi pra-konsentrasi yang efektif untuk memisahkan partikel limbah PCB dengan perbedaan densitas yang signifikan [7]. Melalui metode gravitasi setelah melalui proses *ball mill* dan *screening*, didapat konsentrat tembaga sebesar 86,78% [8]. Salah satu alat pemisahan gravitasi yang digunakan untuk memisahkan logam berharga adalah *shaking table*. Penggunaan *shaking table* ini memungkinkan pemisahan logam dari material plastik dengan efektif. Kadar logam berharga pada PCB dapat meningkat dari 22% menjadi 40% dengan menggunakan *shaking table* [9]. Proses *gravity concentration* limbah elektronik menggunakan *shaking table* dapat memisahkan logam berharga yang memiliki densitas berat dengan logam-logam pengotor lainnya yang memiliki densitas ringan. Logam berharga dengan densitas berat akan terbawa menuju wadah tempat konsentrat dan terpisah dengan *tailing*. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan ditentukan ukuran partikel yang efektif untuk dilakukan pada proses *gravity concentration* limbah elektronik menggunakan alat *shaking table* dan menentukan apakah pemisahan magnetik efektif untuk dilakukan dalam pengambilan logam berharga seperti Cu dan Ag pada limbah PCB.

## 2. Metodologi

Limbah elektronik *Printed Circuit Boards* (PCB) yang digunakan berasal dari perangkat komputer yang sudah tidak terpakai dan diperoleh dari wilayah Tangerang. PCB dilakukan proses *dismantling* dengan memisahkan komponen lain yang berada dipermukaan papan PCB seperti kapasitor, resistor, baterai, dan sebagainya dengan menggunakan tang, palu, obeng, dan gerinda. Proses ini juga meliputi pemotongan papan PCB hingga membentuk potongan kecil berukuran 2 hingga 3 cm. PCB yang telah dipisahkan dan dipotong kemudian dilakukan penggerusan dengan menggunakan hammer mill hingga ukurannya kurang dari 1 mm. Setelah digerus, proses reduksi ukuran dilanjutkan dengan menggunakan *pulverizer mill*. Proses selanjutnya adalah pengayakan dengan ukuran 250 $\mu$ m, 150 $\mu$ m, dan 106 $\mu$ m. Material yang tidak lolos ayakan akan dilakukan proses penggerusan ulang.

Setelah PCB diayak, PCB akan dilakukan pengujian karakterisasi awal menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui senyawa dan unsur yang terkandung pada PCB sebelum dilakukan proses pemisahan. Setelah itu PCB akan dilakukan proses konsentrasi yang terdiri dari tiga percobaan. Percobaan pertama, PCB akan langsung diproses menggunakan *shaking table* yang akan menghasilkan tiga produk yaitu konsentrat, *middling*, dan *tailing*. Ketiga produk tersebut akan diuji menggunakan XRF. Percobaan kedua dilakukan proses pemisahan magnet menggunakan *magnetic separator L800* dengan 1000 Gauss. Material *non-ferrous* akan dipisahkan dengan metode *gravity concentration* menggunakan *shaking table*. Percobaan ketiga, PCB akan dilakukan *magnetic concentrator* lalu material *non-ferrous* akan diproses dengan *shaking table* dan konsentratnya akan diproses kembali menggunakan *davis tube* dengan 900 Gauss.

Hasil terbaik dengan konsentrat terbanyak dan *tailing* yang sedikit akan diambil dan dilakukan proses *dewatering* menggunakan mesin *press*. Setelah dikeringkan menggunakan mesin *press*, sampel akan dilakukan pengujian XRF kembali. Pengujian XRF digunakan untuk mengetahui unsur yang terkandung dalam sampel sehingga bisa diketahui apakah metode penelitian yang dilakukan efektif untuk memisahkan logam berharga pada PCB.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Sampel PCB dilakukan pengujian XRF terlebih dahulu untuk mengetahui unsur apa saja yang terkandung pada sampel awal beserta dengan jumlah kadar unsur yang terkandung pada PCB.

### 3.1 Pengaruh Ukuran Partikel

Karakterisasi awal pada sampel limbah PCB dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur kimia yang terkandung dalam limbah PCB. Hasil analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat dilihat pada Tabel 1. Pada Tabel 1 dapat dilihat 13 unsur yang terkandung dalam PCB dan jumlah kadar dari unsur tersebut. Berdasarkan hasil XRF pada Tabel 1 diketahui bahwa Logam Cu merupakan logam tertinggi yang terkandung dalam PCB yaitu sebesar 30,41%.

Tabel 1. Komposisi Kimia PCB

Komponen	Hasil (%)
Al	7,15
Si	21,19
P	0,703
Ca	8,16
Fe	0,425
Ni	0,074

Cu	30,41
Zn	0,289
Br	20,07
Sr	0,230
Ag	0,099
Sn	9,25
Pb	1,933

Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat bahwa komposisi utama pada PCB sebelum dilakukan proses pemisahan yaitu Cu, Si, Br, Sn, Sn, Ca, dan Al dengan kadar masing-masing unsur berurutan sebesar 30,41%, 21,19 %, 20,07 %, 9,25 %, 8,16 %, 7,15 %, dan 3,93 %. Tembaga (Cu) merupakan logam dengan konsentrasi tertinggi terdapat pada PCB. Tembaga digunakan sebagai *base metal* dari PCB sehingga jumlahnya lebih dominan daripada unsur logam lainnya. Kemudian unsur non-logam seperti Si dan Ca digunakan sebagai bahan *fiberglass* pada bagian substrat PCB dalam bentuk oksida SiO<sub>2</sub> dan CaO [10]. Unsur Sn digunakan sebagai solder pada limbah PCB. Sedangkan unsur Ca dan Ba merupakan non-logam yang digunakan sebagai bahan baku lapisan pada limbah PCB berupa *fiberglass* [11]. Unsur Br merupakan unsur non-metal yang berfungsi sebagai isolator listrik dan juga penghambat panas untuk mengurangi *flammability* dari PCB [11]. Hasil ini sesuai dengan literatur [12] yang menyatakan bahwa unsur logam lebih dominan dibandingkan unsur non-logam pada PCB.

Tabel 2 Kandungan Metal Setelah Dilakukan *Shaking Table*

Ukuran Partikel (μm)	Produk	Massa (g)	Kandungan		
			Cu	Au	Ag
250	Konsentrat	27,46	61,57	0,194	0,083
	Middling	13,1	75,35	0,543	0,085
	Tailing	210,6	30,362	0,084	0,193
150	Konsentrat	10,5	74,34	0,54	0,089
	Middling	8,97	70,2	0,397	0,084
	Tailing	245,4	35,68	0,128	0,168
106	Konsentrat	9,57	71,3	0,155	0,085
	Middling	7,57	79,84	0	0,08
	Tailing	246,26	41,05	0,147	0,165

Berdasarkan Tabel 2 di atas dapat dilihat bahwa pengaruh variabel ukuran terhadap proses pemisahan dengan *shaking table* terhadap nilai kadar Cu dan kadar Ag. Kadar Cu tertinggi diperoleh pada produk *middling* ukuran 106 μm dengan kadar 79,84%, sedangkan kadar Cu yang terendah terdapat pada produk *tailing* ukuran 250 μm dengan kadar 30,362%. Kadar Ag tertinggi diperoleh pada produk *tailing* ukuran 250 μm dengan kadar 0,193%, sedangkan kadar Ag terendah terdapat pada produk *middling* ukuran 106 μm dengan kadar 0,08 %.

Tabel 3 Kandungan Logam setelah dilakukan *Magnetic Separation – Shaking Table*

Ukuran Partikel (μm)	Produk	Massa (g)	Kandungan		
			Cu	Au	Ag
250	Konsentrat	42,09	81,37	0,543	0,084
	Middling	42,83	62,61	0,318	0,098
	Tailing	133,28	13,698	0,067	0,226
150	Konsentrat	42,15	79,68	0,397	0,08
	Middling	30,94	80,65	0,277	0,08
	Tailing	177,97	7,474	0,116	0,251
106	Konsentrat	43,73	75,34	0	0,075
	Middling	54,44	58,7	0	0,11
	Tailing	166,08	22,783	0	0,205

Berdasarkan Tabel 3 diatas dapat dilihat, bahwa pengaruh variabel ukuran terhadap proses pemisahan dengan dilakukan *magnetic separation* sebelum proses *shaking table* terhadap nilai kadar Cu dan kadar Ag. Kadar Cu tertinggi diperoleh pada produk konsentrat ukuran 250μm dengan kadar 81,37%, sedangkan kadar Cu yang terendah terdapat pada produk *tailing* ukuran 150μm dengan kadar 7,474%. Kadar Ag tertinggi diperoleh pada produk *tailing* ukuran 150μm dengan kadar 0,251%, sedangkan kadar Ag terendah terdapat pada produk konsentrat ukuran 106μm dengan kadar 0,075%.

Tabel 4 Kandungan Logam pada Konsentrasi setelah dilakukan *Magnetic Separation – Shaking Table – Magnetic Separation*

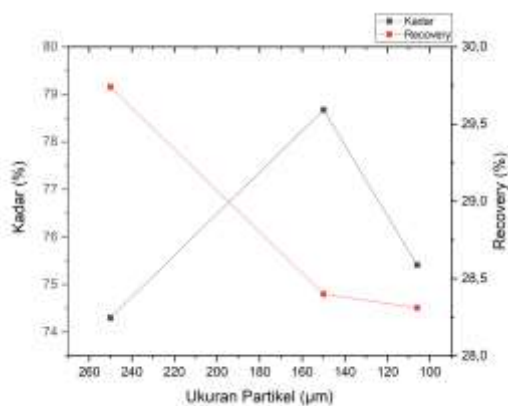
Ukuran Partikel (μm)	Massa (g)	Kandungan		
		Cu	Au	Ag

250	30,55	79,94	0	0,08
150	34,86	82	0,367	0,07
106	37,66	79,6	0,275	0,079

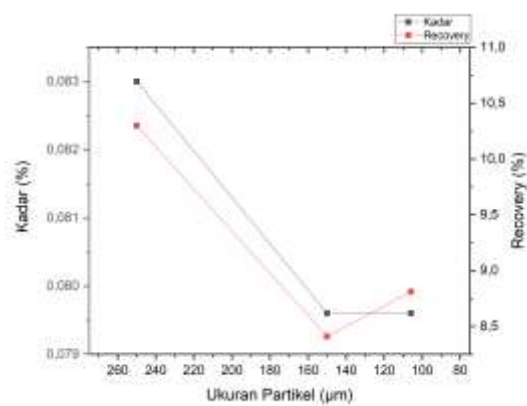
Berdasarkan Tabel 4 di atas dapat dilihat, bahwa pengaruh variabel ukuran terhadap proses pemisahan dengan *magnetic separation* sebelum proses *shaking table* dan dilakukan *magnetic separation* kembali terhadap nilai kadar Cu dan kadar Ag. Kadar Cu tertinggi diperoleh pada ukuran 150 $\mu\text{m}$  dengan kadar 82%, sedangkan kadar Cu yang terendah terdapat pada ukuran 106 $\mu\text{m}$  dengan kadar 79,6%. Kadar Ag tertinggi diperoleh pada ukuran 250 $\mu\text{m}$  dengan kadar 0,08 %, sedangkan kadar Ag terendah terdapat pada ukuran 150 $\mu\text{m}$  dengan kadar 0,07%. Hasil percobaan ini memiliki kadar emas tertinggi sebesar 0,543% seperti pada tabel 3. Hasil ini menandakan bahwa pemisahan dengan menggunakan *shaking table* dapat memisahkan emas dan juga menunjukkan bahwa pengolahan limbah PCB lebih efektif dibandingkan dengan bijih emas di alam dengan konsentrasi antara 1 - 10 g/t [13].

### 3.2 Pengaruh Ukuran Partikel

Ukuran PCB yang digunakan dalam pemisahan logam berharga dari pengotornya menggunakan *shaking table* dapat mempengaruhi kadar dan *recovery*. Dalam proses pemisahan logam dengan *shaking table*, partikel yang berukuran kasar dan halus dapat diproses menggunakan *shaking table*, tetapi akan memberikan pengaruh yang berbeda pada prosesnya. Ukuran akan mempengaruhi gaya dorong fluida dan gaya gesek yang menentukan partikel masuk ke zona konzentrat atau *tailing* [14]. Analisis pengaruh ukuran partikel dilakukan untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel terhadap kadar dan nilai *recovery* konzentrat pada Cu dan Ag yang didapatkan pada penelitian ini.



**Gambar 1** Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Nilai Kadar dan Recovery Cu

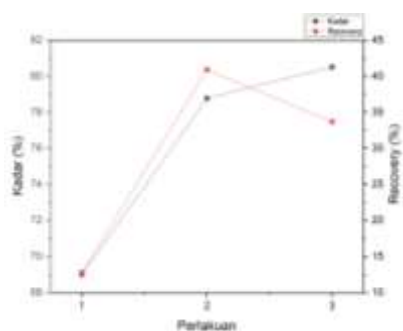


**Gambar 2** Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Nilai Kadar dan Recovery Ag

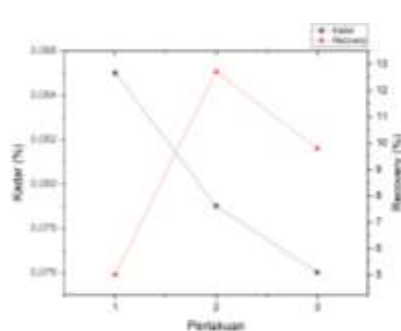
Dua grafik di atas menjelaskan mengenai pengaruh ukuran terhadap nilai kadar dan *recovery* yang didapatkan. Pada Gambar 1 diketahui ukuran dengan kadar tertinggi diperoleh pada ukuran partikel 150 $\mu\text{m}$  dengan kadar rata – rata 78,763%. Pada ukuran 250 $\mu\text{m}$  didapatkan nilai kadar Cu yang paling rendah yaitu sebesar 74,297 % . Berdasarkan literatur [7] menyatakan semakin halus ukuran membuat pemisahan partikel logam dan non logam semakin besar. Oleh karena itu pada ukuran 250 um banyak partikel logam dan non logam masih bercampur sehingga menyebabkan kadar Cu pada konzentrat berkurang. Bentuk dari tembaga yang pipih juga berpengaruh pada hasil yang diperoleh [15], hal tersebut menyebabkan semakin besar ukuran partikel maka semakin pipih bentuk tembaga yang membuat semakin sulit jatuh dan terbawa oleh aliran fluida. Sedangkan untuk *recovery*, semakin kecil ukuran partikel menyebabkan semakin menurun nilai persen *recovery*. Pada Gambar 2 menunjukkan semakin kecil ukuran partikel menyebabkan semakin kecil nilai kadar Ag yang diperoleh. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran yang terlalu halus menyebabkan partikel cenderung kearah zona *tailing*. Sedangkan perolehan *recovery* rata – rata Ag tertinggi terdapat pada ukuran 250 $\mu\text{m}$  dengan 10,31 % dan *recovery* rata- rata terendah pada ukuran 150 $\mu\text{m}$  yaitu sebesar 8,415%. Berdasarkan penelitian [16] ukuran yang terlalu halus dapat menurunkan nilai kadar Cu yang diperoleh. Hal tersebut juga sesuai dengan literatur, bahwa ukuran dan kepadatan memiliki korelasi positif dengan kecepatan akhir pengendapan partikel [17].

### 3.3 Pengaruh Pemisahan Magnet

Pemisahan magnet juga merupakan variabel yang penting. Dalam partikel limbah PCB yang diproses memiliki kandungan besi dan nikel yang relatif besar. Dengan membandingkan karakteristik material, pemisahan magnetik dapat secara efektif memisahkan besi dan nikel dari logam *nonferrous* lainnya [18]. Analisis pengaruh pemisahan magnet dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap jumlah kadar dan nilai *recovery* pada konzentrat Cu dan Ag. Percobaan dilakukan dengan variabel pemisahan menggunakan alat *shaking table* (1), *magnetic separation 1 – shaking table* (2), *magnetic separation 1 – shaking table - magnetic separation 2* (3). Pada *magnetic separation* menggunakan intensitas magnet sebesar 1000G dan 900G.



**Gambar 3** Pengaruh Pemisahan Magnet terhadap Nilai Kadar dan Recovery Cu



**Gambar 4** Pengaruh Pemisahan Magnet terhadap Nilai Kadar dan Recovery Ag

Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui pengaruh pemisahan magnet terhadap nilai kadar dan *recovery*. Pengaruh dari metode yang dilakukan dapat mempengaruhi hasil dari penelitian. Pada Gambar 3 menunjukkan pengaruh pemisahan magnet yaitu dapat meningkatkan nilai kadar Cu. Berdasarkan literatur, pemisahan magnetik dapat secara efektif memisahkan besi dan nikel dari logam *nonferrous* pada limbah PCB [18]. Perbedaan nilai intensitas *magnetic* yang diaplikasikan berpengaruh pada kuat daya tarik magnet. Logam Cu dan Ag merupakan golongan logam diamagnetic, sehingga tidak dapat ditarik oleh magnet [19]. Pada Gambar 4 menunjukkan pengaruh pemisahan magnet, yaitu menurunkan nilai kadar Ag yang diperoleh. Hal ini disebabkan karena semakin banyak unsur Ag yang terbawa oleh aliran fluida masuk ke dalam *tailing* sehingga kadar ag terus berkurang seiring banyaknya proses yang dilakukan, terlihat pada tabel 4. Bentuk grafik *recovery* Cu dan Ag memiliki bentuk yang sama hal ini menandakan bahwa pemisahan magnet kembali dengan intensitas yang rendah dapat menurunkan nilai *recovery*. Hal ini sesuai berdasarkan penelitian [20], yaitu PCB yang diproses menggunakan metode pemisahan magnetik yang dilakukan dua kali pemisahan dapat menurunkan nilai *recovery* pada Cu.

#### 4. Kesimpulan

Pada pemisahan logam berharga dari limbah PCB, ukuran partikel yang efektif dengan alat *shaking table* terdapat pada ukuran 150  $\mu\text{m}$  untuk logam Cu. Pada ukuran tersebut didapatkan kadar Cu sebesar 78,673%. Sedangkan pada ukuran 250 $\mu\text{m}$  didapatkan *recovery* tertinggi Cu yaitu 29,74%. Pada logam Ag, ukuran partikel PCB yang efektif adalah 250 $\mu\text{m}$  dengan kadar dan nilai *recovery* Ag tertinggi yaitu 0,083%. Jumlah pemisahan magnetik yang efektif untuk memisahkan logam Cu adalah dua kali. Pada dua kali pemisahan magnetik didapatkan kadar Cu tertinggi sebesar 80,51%. Sedangkan untuk nilai *recovery* Cu tertinggi didapatkan pada pemisahan magnetik sebanyak satu kali yaitu sebesar 40,87%. Pada logam Ag, kadar tertinggi didapatkan tanpa adanya pemisahan magnetik yaitu sebesar 0,085%. Sedangkan untuk nilai *recovery* tertinggi logam Ag didapatkan pada pemisahan magnetik satu kali yaitu sebesar 12,7%. Proses daur ulang limbah PCB dapat menjadi metode alternatif untuk mendapatkan bahan baku logam berharga di masa depan yang semakin menipis. Selain itu, daur ulang PCB juga dapat mengurangi jumlah *e-waste* diseluruh dunia sehingga mengurangi dampak yang dihasilkan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Puckett J, Byster L, Westervelt S, Gutierrez R, Davis S, Hussain A, Dutta M (2002) Exporting harm—the high-tech trashing of Asia; The Basel Action Network (BAN) Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC): Seattle, WA, USA
- [2] <https://www.globalewaste.org/> (2020). The Global E-waste Monitor 2020-Quantities, flows, and the circular economy potential. Diakses pada 25 November 2021, [https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM\\_2020\\_def\\_july1\\_low.pdf](https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf)
- [3] Kementerian lingkungan hidup. (2021, 14 Oktober). Webinar pengelolaan sampah. Diakses pada 25 November 2021, [https://sipsn.menlhk.go.id/download/ewaste2021/Sambutan\\_Dirjen\\_webinar\\_Ewaste\\_14\\_Okt\\_21.pdf](https://sipsn.menlhk.go.id/download/ewaste2021/Sambutan_Dirjen_webinar_Ewaste_14_Okt_21.pdf)
- [4] Kaya M (2018) Current WEEE recycling solutions, Chap. 3. In: Veglio F, Birloaga I (eds) Waste electrical and electronic equipment recycling, aqueous recovery methods, pp 33–93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102057-9.00003-2>
- [5] Sun Z, Cao H, Xiao Y, Sietsma J, Jin W, Agherhuis H, Yang Y (2017) Towards sustainability for recovery of critical metals from electronic waste: the hydrochemistry processes. *ACS Sustain Chem* 5:21–401.
- [6] Zhang, Y., Liu, S., Xie, H., Zeng, X., & Li, J. (2012). *Current Status on Leaching Precious Metals from Waste Printed Circuit Boards*. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 560–568. doi:10.1016/j.proenv.2012.10.077.
- [7] Shi, S., Nie, C., Chang, H., Wu, P., Piao, Z., & Zhu, X. (2021). *Physical pre-concentration and ammonium leaching of metal copper from waste printed circuit boards*. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128512.
- [8] Liu, F., Chen, W., Wan, B., Chen, H., Ling, Z., Chen, Z., & Fu, Z. (2020). *Recovery of high-grade copper from metal-rich particles of waste printed circuit boards by ball milling and sieving*. *Environmental Technology*, 1–19.
- [9] Vidyadhar, A., Chalavadi, G., & Das, A. (2013). Stratification and segregation features of pulverized electronic waste in flowing film concentration. *Journal of Environmental Management*, 118, 49–54. doi:10.1016/j.jenvman.2013.01.012.
- [10] Jianjun, H. et al. (2004) 'DC Arc plasma disposal of printed circuit board', *Plasma Science and Technology*. doi: 10.1088/1009-0630/6/4/016.
- [11] Szalatkiewicz, J. (2014). Metals content in printed circuit board waste. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(6), 2365–2369.
- [12] de Oliveira, C. M., Bellopede, R., Tori, A., Zanetti, G., & Marini, P. (2022). Gravity and Electrostatic Separation for Recovering Metals from Obsolete Printed Circuit Board. *Materials*, 15(5), 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma15051874>
- [13] Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28–37. doi:10.1016/j.mineng.2011.09.019

- [14] Gaudin, A.M. 1939. Principles Of Mineral Dressing, Mc Graw Hill Book Company, New York
- [15] ZHANG, S., FORSSBERG, E., 1999. Intelligent liberation and classification of electronic scrap, Powder Technology. 105, 295-301.
- [16] Burat, F., & Özer, M. (2018). Physical separation route for printed circuit boards. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54(2), 554–566. <https://doi.org/10.5277/ppmp1858>
- [17] Batalović, V., 2011. Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing. *Int. J. Miner. Process* 100 (3-4), 86–95.
- [18] Lim, J., Yeap, S. P., & Low, S. C. (2014). Challenges associated to magnetic separation of nanomaterials at low field gradient. *Separation and Purification Technology*, 123, 171–174. doi:10.1016/j.seppur.2013.12.038
- [19] Lide, D. R., ed. (2005). "Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds". *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (PDF) (edisi ke-86). Boca Raton (FL): CRC Press. ISBN 0-8493-0486-5.
- [20] Yoo, J.-M., Jeong, J., Yoo, K., Lee, J., & Kim, W. (2009). Enrichment of the metallic components from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill. *Waste Management*, 29(3), 1132–1137. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.035