

Preliminary Evaluation of Alkali-Glycine Pretreatment for Base Metal Leaching from Waste Printed Circuit Boards (PCB)

Agita Kaila Warohmah^{1*}, Yus Rama Denny², Ganesha Antarnusa¹ Moch. Reza Firdaus³

¹ Progam Studi Pendidikan Fisika, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Indonesia;

² Lab. Fotovoltaik, Devais Fungsional, dan Kecerdasan Buatan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

³ E-WasteRj, Jakarta Pusat, Indonesia

Email: yusramadenny@untirta.ac.id

Abstract

Waste printed circuit boards (PCB) have potential as a secondary source of valuable metals; however, the high content of base metals may hinder the recovery of precious metals, thereby requiring a pretreatment stage. This study aimed to conduct a preliminary evaluation of alkali-glycine pretreatment for base metal leaching from waste printed circuit boards. PCB samples were reduced to a particle size of <2 mm and separated into particle size fractions of -60 mesh and -120 mesh. The pretreatment stage was carried out under alkaline conditions, followed by glycine leaching using a glycine concentration of 30 g/L at pH 11, agitation speed of 300 rpm, and leaching time of 24 h under ambient conditions. Initial characterization was performed using X-Ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma (ICP), while leaching filtrates were analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The characterization results showed that Cu was the dominant metal with a concentration of 21.775 wt.%, while Au and Ag contents reached 522 ppm and 668 ppm, respectively. Leaching results indicated that Cu and Zn were dissolved in limited amounts, whereas Au was not detected in the filtrate. Cu recovery remained relatively low and showed no significant difference between particle sizes, indicating that particle size reduction under the applied conditions had limited influence on leaching performance. The findings suggest that alkali-glycine pretreatment has potential as an initial step for reducing base metal content prior to precious metal recovery, although further optimization of operating conditions is required to improve leaching efficiency.


Article History:

Received 02 April 2026

Accepted 28 April 2026

Keyword:

Copper Recovery,
Glycine Leaching,
Hydrometallurgy,
Printed Circuit Board.

© 2026 The Authors. This open access article is distributed under a (CC-BY License) 

How to Cite:

Warohmah, A. K., Denny, Y. R., Antarnusa, G., & Firdaus, M. R. (2026). Preliminary Evaluation of Alkali-Glycine Pretreatment for Base Metal Leaching from Waste Printed Circuit Boards (PCB). *SEARCH: Science Education Research Journal*, 4(2), 262-272. <https://doi.org/10.47945/search.v4i2.2962>

PENDAHULUAN

Peningkatan penggunaan perangkat elektronik secara global berdampak pada kenaikan jumlah limbah elektronik (*electronic waste/e-waste*) setiap tahunnya. Laporan Global E-waste Monitor menunjukkan bahwa jumlah limbah elektronik dunia telah mencapai 62 juta ton pada tahun 2022 dan diperkirakan terus meningkat seiring perkembangan teknologi (Baldé et al. 2024). Salah satu komponen utama limbah elektronik yang memiliki nilai ekonomi tinggi adalah PCB, karena mengandung berbagai jenis logam seperti tembaga (Cu), emas (Au), dan perak (Ag) (Hao et al. 2020). Kandungan tembaga (Cu) pada PCB dilaporkan dapat mencapai 10-30% sedangkan kandungan emas (Au) berkisar 80-1500 ppm tergantung jenis perangkat elektroniknya (Oke & Potgieter. 2024). Limbah PCB tidak hanya mengandung logam bernilai seperti Cu, Au, dan Ag, tetapi juga berbagai material non-logam yang masih berpotensi untuk dimanfaatkan kembali melalui proses daur ulang yang tepat (Kaya. 2016). Nilai tersebut menunjukkan bahwa PCB bekas berpotensi dimanfaatkan sebagai

sumber sekunder logam bernilai (*urban mining*)(Nithya et al., 2020), bahkan pada beberapa kasus memiliki kadar logam tertentu yang lebih tinggi dibandingkan bijih primer. kandungan emas (Au) pada PCB dapat mencapai 300 hingga 1000 ppm, jauh lebih tinggi dari pada bijih emas alami yang umumnya hanya berkisar 1-10 ppm. Perbedaan signifikan ini menunjukkan bahwa limbah PCB sangat potensial dimanfaatkan sebagai sumber emas sekunder yang bernilai ekonomis sekaligus menjadi solusi reduksi pencemaran lingkungan (Birich et al. 2023).

Meskipun memiliki potensi tinggi, proses *recovery* logam dari limbah PCB masih menghadapi tantangan, terutama akibat dominasi logam dasar seperti tembaga (Cu), seng (Zn), dan timah (Pb). Kandungan tembaga (Cu) yang tinggi dapat meningkatkan konsumsi reagen pelindian sekaligus menurunkan efisiensi pemisahan logam mulia. Oleh karena itu, tahapan *pretreatment* diperlukan untuk mengurangi sebagian logam dasar sebelum *recovery* logam mulia dilakukan. Salah satu pendekatan yang dikembangkan adalah metode hidrometalurgi karena memiliki kebutuhan energi lebih rendah dibandingkan pirometalurgi serta menghasilkan emisi yang relatif kecil (Li et al., 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan glisin (*glycine*) mulai dikembangkan sebagai agen pelindian yang lebih ramah lingkungan dibandingkan sianida atau asam kuat. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa glisin memiliki kemampuan melindi tembaga (Cu) dari limbah PCB dengan efisiensi yang bervariasi, berkisar antara 30–80% bergantung pada kondisi operasi yang digunakan, seperti pH, waktu kontak, ukuran partikel, dan keberadaan oksidator (Broeksma & Dorfling, 2023).

Kemampuan glisin dalam melarutkan logam, khususnya tembaga (Cu), berkaitan dengan mekanisme pembentukan kompleks logam–ligan yang stabil selama proses pelindian. Pada kondisi basa, ion Cu^{2+} dapat berikatan dengan glisin membentuk kompleks *Cu-glycine* terlarut, sehingga meningkatkan perpindahan logam dari fase padat ke fase cair. Stabilitas kompleks tersebut berperan penting dalam menjaga logam tetap berada di dalam larutan dan mengurangi kemungkinan presipitasi kembali selama proses berlangsung (Oraby & Eksteen. 2014; Li et al. 2022)

Efektivitas glisin juga dipengaruhi oleh spesiasi kimianya pada kondisi pH tertentu. Pada pH basa, glisin dominan berada dalam bentuk anion glisinat (*glycinate ion*) yang memiliki kemampuan koordinasi lebih baik terhadap ion logam dibandingkan bentuk terprotonasi pada kondisi asam. Oleh karena itu, sistem *alkali-glycine* pada pH tinggi diketahui lebih mendukung pembentukan kompleks *Cu-glycine* yang stabil dan meningkatkan kecenderungan pelarutan logam dasar seperti tembaga (Cu) (Oraby & Eksteen. 2015). Namun, pelarutan logam mulia seperti Au umumnya masih terbatas apabila tidak disertai agen pengoksidasi tambahan (Godigamuwa & Okibe. 2023).

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan pola bahwa efektivitas glisin cenderung meningkat ketika dikombinasikan dengan reagen tambahan. Beberapa penelitian menggunakan hidrogen peroksida (H_2O_2) sebagai oksidator untuk membantu proses pelarutan logam tertentu, terutama tembaga (Cu), sehingga jumlah logam yang terlarut cenderung meningkat dibanding penggunaan glisin tunggal (Broeksma & Dorfling. 2023). Selain itu, kombinasi *glycine-thiosulfate* juga dilaporkan mampu meningkatkan proses pelindian logam, khususnya logam mulia, melalui pembentukan kompleks logam yang lebih stabil (Godigamuwa & Okibe. 2023). Temuan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan glisin sering kali dikombinasikan dengan reagen lain guna memperoleh hasil pelindian yang lebih optimal. Namun, pendekatan tersebut menyebabkan sistem pelindian menjadi lebih kompleks dan membutuhkan pengendalian kondisi operasi yang lebih ketat.

Di sisi lain, kajian mengenai penggunaan glisin tunggal tanpa penambahan oksidator sebagai tahap awal (*pretreatment*) untuk mengurangi logam dasar pada limbah PCB masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian lebih banyak berfokus pada pemulihan logam mulia atau penggunaan beberapa reagen secara bersamaan untuk meningkatkan efisiensi proses. Padahal, keberadaan logam dasar seperti tembaga (Cu), seng (Zn), dan timah (Pb) dalam jumlah tinggi dapat mempengaruhi

efektivitas pemisahan logam bernilai pada tahapan berikutnya. Oleh sebab itu, evaluasi terhadap kemampuan glisin tunggal sebagai pelindi awal logam dasar menjadi penting untuk dilakukan, terutama pada kondisi alkali tanpa penambahan oksidator.

Kontribusi penelitian ini terletak pada evaluasi awal sistem *alkali-glycine* tanpa penambahan agen pengoksidasi eksternal sebagai tahap *pretreatment* untuk pelindian logam dasar dari limbah PCB. Pendekatan ini berbeda dari sebagian besar penelitian sebelumnya yang lebih banyak berfokus pada *recovery* logam mulia atau menggunakan kombinasi beberapa reagen untuk meningkatkan efisiensi pelindian. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan pengaruh ukuran partikel yaitu -60 mesh dan -120 mesh terhadap kecenderungan pelindian logam dasar. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi potensi *pretreatment* alkali-glisin terhadap pelindian logam dasar dari limbah PCB melalui karakterisasi awal material dan analisis logam terlarut hasil pelindian.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi efektivitas sistem *alkali-glycine* dalam proses *pretreatment* pelindian logam dasar pada limbah PCB. Pendekatan eksperimen dipilih karena memungkinkan pengamatan langsung terhadap kemampuan glisin dalam melindi logam dasar pada kondisi operasi yang terkontrol, meliputi ukuran partikel, pH larutan, waktu kontak, konsentrasi pelindi, serta kecepatan pengadukan.

Sampel dan bahan penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah PCB yang berasal dari modul RAM bekas komputer. Sampel RAM dikumpulkan dari limbah elektronik, kemudian dilakukan preparasi melalui proses pemotongan, *crushing*, *grinding*, dan pengayakan hingga diperoleh ukuran partikel -60 mesh dan -120 mesh sebelum digunakan dalam proses pelindian.



Gambar 1. Limbah PCB RAM

Reagen pelindi yang digunakan berupa larutan glisin (*glycine*) dengan konsentrasi 30 g/L sebagai agen pelindi utama hidrometalurgi. Pengaturan kondisi basa dilakukan menggunakan larutan NaOH untuk menaikkan pH larutan hingga kondisi alkali, sedangkan aquades digunakan dalam proses preparasi larutan, pencucian residu, dan pengenceran sampel sebelum analisis.

Preparasi Sampel PCB

Preparasi sampel dilakukan untuk memperoleh ukuran partikel limbah PCB yang lebih homogen sebelum proses pelindian. Tahap awal preparasi dimulai dengan pemotongan limbah PCB menjadi bagian yang lebih kecil untuk mempermudah proses pengecilan ukuran pada tahap berikutnya. Sampel PCB yang telah dipotong kemudian diperkecil ukurannya menggunakan *crusher* untuk menghasilkan ukuran material yang lebih kecil dan seragam. Proses ini bertujuan untuk mempermudah tahapan penghalusan berikutnya serta meningkatkan efisiensi preparasi sampel.

Material hasil crusher selanjutnya dihaluskan (*grinding*) hingga diperoleh sampel berbentuk serbuk (*powder*).



Gambar 2. Hasil planetary



Gambar 3. Hasil crusher

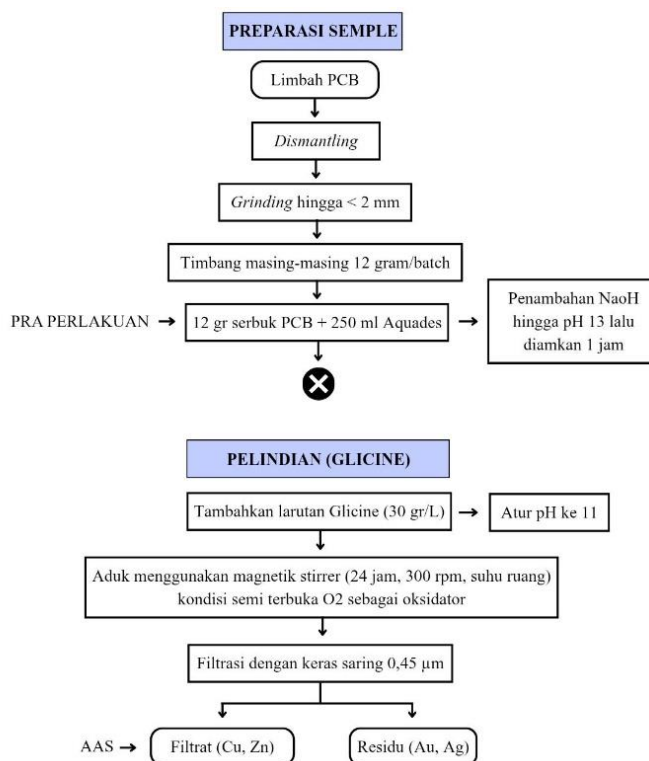


Gambar 4. Hasil grinding

Proses penghalusan dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan kontak material sehingga dapat mendukung interaksi antara logam pada PCB dengan larutan pelindi selama proses leaching berlangsung. Serbuk PCB hasil grinding kemudian dipisahkan berdasarkan ukuran partikel menggunakan metode pengayakan (*sieving*). Pada penelitian ini digunakan dua variasi ukuran partikel, yaitu -60 mesh dan -120 mesh, yang selanjutnya digunakan sebagai sampel pada proses pelindian.

Tahapan Penelitian

Proses penelitian ini diawali dengan preparasi sampel limbah PCB melalui tahapan dismantling, pengecilan ukuran (*crushing* dan *grinding*), serta pengayakan hingga diperoleh ukuran partikel -60 mesh dan -120 mesh. Sampel kemudian ditimbang sebanyak 12 gram untuk setiap batch percobaan. Tahapan berikutnya dilakukan pretreatment alkali (*alkali pretreatment*). Sebanyak 12 gram sampel PCB dimasukkan ke dalam wadah reaksi, lalu ditambah 250 ml aquades. Larutan NaOH ditambah secara bertahap hingga mencapai pH 13, kemudian campuran didiamkan selama 1 jam.



Gambar 5. Diagram alir tahapan preparasi sampel, pretreatment alkali, dan pelindian menggunakan glisin pada limbah PCB

Tahap ini dilakukan untuk menciptakan kondisi basa awal serta membantu mempersiapkan permukaan material sebelum proses pelindian menggunakan glisin dilakukan. Selain itu, kondisi alkali berpotensi memengaruhi pelarutan beberapa komponen pengotor tertentu pada limbah PCB.

Tahap berikutnya dilakukan proses pelindian menggunakan larutan glisin berkonsentrasi 30 g/L. pH larutan diatur pada pH 11 menggunakan NaOH dan dipantau secara berkala selama proses pelindian untuk menjaga kestabilan kondisi operasi. Campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 300 rpm selama 24 jam pada suhu ruang dengan kondisi semi terbuka. Setelah proses pelindian selesai, campuran dipisahkan melalui proses filtrasi menggunakan kertas saring laboratorium untuk memperoleh filtrat dan residu. Residu hasil pelindian dicuci menggunakan aquades sebanyak tiga kali, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C sebelum ditimbang. Filtrasi hasil pelindian digunakan untuk analisis kandungan logam menggunakan AAS.

Karakterisasi dan Analisis Sampel

Karakterisasi awal sampel PCB dilakukan menggunakan instrumen ICP dan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui kandungan awal logam pada material sebelum proses pelindian dilakukan. Hasil karakterisasi awal digunakan untuk memperoleh informasi kandungan logam dasar dan logam bernilai pada material sebelum proses pelindian. Analisis larutan hasil pelindian dilakukan menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi logam yang terlarut pada filtrat. Parameter logam yang dianalisis meliputi emas (Au), tembaga (Cu), dan seng (Zn). Hasil analisis menunjukkan bahwa emas (Au) tidak terdeteksi pada filtrat hasil pelindian, sedangkan tembaga (Cu) dan seng (Zn) digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi efektivitas pelindian logam dasar menggunakan glisin. Data hasil karakterisasi awal dibandingkan dengan analisis larutan pelindian untuk mengevaluasi kecenderungan pelarutan logam dasar pada masing-masing ukuran partikel.

Analisis Filtrat Hasil Pelindian

Data hasil karakterisasi awal dan hasil analisis AAS diolah menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif. Evaluasi efektivitas proses pretreatment dilakukan melalui perbandingan kandungan awal logam pada sampel PCB terhadap konsentrasi logam yang terlindi setelah proses pelindian. Hasil pengujian dari masing-masing pengulangan (*duplo*) dirata-ratakan untuk melihat kecenderungan pelindian logam pada variasi ukuran partikel -60 mesh dan -120 mesh. Selanjutnya, perbedaan hasil pelindian pada masing-masing ukuran partikel digunakan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran partikel terhadap kemampuan glisin dalam melindi logam dasar dari limbah PCB.

Perhitungan *recovery* logam dilakukan untuk mengetahui efektivitas proses pelindian dalam melarutkan logam dari limbah PCB. *Recovery* dihitung berdasarkan perbandingan antara massa logam yang berhasil terlarut dalam larutan hasil pelindian dengan massa logam awal yang terkandung dalam sampel sebelum proses pelindian. Konsentrasi logam hasil analisis AAS dikonversi menjadi konsentrasi sebenarnya dengan memperhitungkan faktor pengenceran yang digunakan pada tahap preparasi sampel. Pada penelitian ini, sampel filtrat hasil pelindian diencerkan dengan faktor pengenceran 1:25 menggunakan aquades, sehingga konsentrasi aktual diperoleh dengan mengalikan hasil pembacaan AAS dengan faktor 25. Sehingga konsentrasi sebenarnya adalah $C_{sebenarnya} = C_{AAS} \times 25$. Massa logam terlarut dihitung dan *recovery* (%) menggunakan persamaan:

$$m = \frac{C \times V}{1000} \quad (1)$$

$$\text{Recovery (\%)} = \frac{\text{Massa logam terlindi}}{\text{Massa logam awal}} \quad (2)$$

Dalam persamaan (1) m adalah massa logam terlindi (g), C adalah konsentrasi logam sebenarnya (ppm atau mg/L) dan V adalah volume akhir larutan hasil pelindian (L). Persamaan (2) adalah nilai *recovery* logam. Metode perhitungan ini digunakan untuk mengevaluasi efektivitas proses pelindian pada berbagai ukuran partikel serta kondisi operasi yang digunakan, sehingga dapat diketahui pengaruh parameter proses terhadap tingkat pelarutan logam dari limbah PCB.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi dan Komposisi Awal Limbah PCB

Karakterisasi awal limbah PCB dilakukan untuk mengetahui kandungan logam sebelum proses pelindian menggunakan sistem *alkali-glycine*. Analisis awal dilakukan menggunakan instrument ICP dan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa sampel PCB memiliki kandungan logam dasar yang dominan serta sejumlah logam bernilai.

Karakterisasi menggunakan ICP dilakukan untuk mengetahui kadar logam tertentu secara spesifik, terutama logam dasar dan logam bernilai pada sampel PCB. Pada pengujian ICP, sampel terlebih dahulu mengalami proses destruksi menggunakan larutan asam sehingga unsur logam dalam material dapat larut dalam bentuk ion. Larutan hasil destruksi kemudian dianalisis menggunakan plasma bersuhu tinggi untuk mengidentifikasi serta mengukur konsentrasi unsur berdasarkan spektrum emisi yang dihasilkan. Hasil analisis ICP menunjukkan bahwa kandungan tembaga (Cu) pada sampel PCB mencapai 21.775 wt.%, sehingga menjadi unsur dominan dibanding logam lainnya. Selain tembaga (Cu), terdeteksi pula logam bernilai seperti emas (Au) sebesar 522 ppm dan perak (Ag) sebesar 668 ppm, serta unsur lain seperti seng (Zn) sebesar 185.5 ppm, timah (Sn) sebesar 1.665 wt.%, karbon (C) total sebesar 19.565 wt.%, dan sulfur (S) total sebesar 0.13 wt.%.

Table 1. Hasil karakterisasi awal limbah PCB berdasarkan ICP

Parameter	Konsentrasi
Au	522 ppm
Ag	668 ppm
Zn	185.5 ppm
Cu	21.775 wt. %
Sn	1.665 wt. %
Fe	0.48 wt. %
Total Karbon	19.565 wt. %
Total Sulfur	0.13 wt. %

Setelah karakterisasi menggunakan ICP, analisis komposisi unsur juga dilakukan menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengidentifikasi unsur-unsur penyusun utama pada sampel PCB. Pengujian XRF dilakukan dengan memanfaatkan interaksi sinar-X terhadap permukaan material, di mana unsur-unsur dalam sampel akan memancarkan radiasi fluoresensi dengan energi khas yang selanjutnya diterjemahkan menjadi jenis serta kadar unsur tertentu. Sebelum pengujian dilakukan, sampel PCB dipersiapkan dalam bentuk serbuk agar menghasilkan permukaan analisis yang lebih homogen. Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa sampel PCB tersusun atas berbagai unsur logam maupun non-logam dengan komposisi beragam. Unsur tembaga (Cu) teridentifikasi sebagai salah satu unsur dominan, disertai keberadaan unsur lain seperti besi (Fe), aluminium (Al), silicon (Si), kalsium (Ca), timah (Sn), dan beberapa unsur lain dengan kadar yang berbeda.

Table 2. Hasil karakterisasi awal limbah PCB berdasarkan *X-Ray Fluorescence* (XRF).

Parameter	Konsentrasi (wt. %)	Parameter	Konsentrasi (wt. %)
Ca	19.5	Cu	15.7
Ti	0.66	Au	0.39
Cr	0.20	Al	6
Mn	0.03	P	0.48
Fe	2.21		

Perbedaan hasil karakterisasi logam yang diperoleh dari analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan ICP pada penelitian ini dapat dipengaruhi oleh perbedaan prinsip kerja masing-masing instrumen serta karakteristik limbah PCB yang bersifat heterogen. Analisis XRF dilakukan secara langsung pada sampel padat sehingga hasil pengukuran sangat dipengaruhi oleh distribusi unsur pada permukaan area yang terdeteksi. Pada limbah PCB, distribusi logam umumnya tidak homogen karena logam tertentu dapat terlokalisasi pada bagian tertentu, seperti jalur konduktor, solder, konektor, maupun lapisan pelapis logam, sehingga kandungan unsur yang terukur dapat bervariasi antar titik analisis (Huang et al. 2022; Huy et al. 2023).

Sebaliknya, analisis ICP dilakukan setelah proses destruksi sampel sehingga unsur logam terlebih dahulu dilarutkan ke dalam larutan. Dengan demikian, hasil analisis ICP cenderung merepresentasikan komposisi rata-rata keseluruhan material yang telah terhomogenisasi. Perbedaan prinsip tersebut menyebabkan hasil karakterisasi antar metode, termasuk pada logam berkadar rendah maupun logam dengan distribusi tidak merata seperti Au, dapat menunjukkan variasi nilai yang cukup signifikan. Selain itu, efisiensi destruksi sampel, ukuran partikel, homogenitas material, serta sensitivitas masing-masing instrumen terhadap unsur tertentu juga dapat memengaruhi hasil pengukuran (Duan & Zhu. 2022).

Dengan demikian, perbedaan hasil karakterisasi ICP dan XRF pada penelitian ini tidak selalu menunjukkan ketidaksesuaian data, tetapi lebih mencerminkan perbedaan representasi sampel dan karakteristik analitik dari masing-masing metode yang digunakan.

Hasil Pelindian Alkali-Glisin terhadap Pelarutan Logam

Proses pelindian limbah PCB dilakukan menggunakan larutan glisin konsentrasi 30 g/L pada kondisi pH 11, waktu kontak 24 jam, kecepatan pengadukan 300 rpm, dan suhu ruang. Kondisi basa dipilih karena glisin diketahui memiliki kestabilan kompleks logam yang lebih baik pada lingkungan alkali, terutama terhadap logam dasar tertentu. Setelah proses pelindian selesai, campuran dipisahkan melalui proses filtrasi menggunakan kertas saring untuk memperoleh filtrat yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode AAS.

Analisis AAS dilakukan untuk mengetahui konsentrasi logam terlarut pada filtrat hasil pelindian. Prinsip kerja metode ini didasarkan pada kemampuan atom logam menyerap radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu, sehingga memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi logam dengan sensitivitas yang tinggi. Pada penelitian ini, logam yang dianalisis meliputi tembaga (Cu), seng (Zn), dan emas (Au), sebagai representasi logam dasar dan logam bernilai pada limbah PCB.

Table 3. Hasil analisis *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) filtrat pelindian

Ukuran partikel	Batch	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Au (ppm)
-120 mesh	1	22.40	0.3730	ND
-120 mesh	2	28.27	0.5297	ND
-60 mesh	3	23.23	0.3341	ND
-60 mesh	4	27.92	0.3708	ND

Ket. ND (Not Detected) menunjukkan logam tidak terdeteksi oleh instrument

Konsentrasi tembaga (Cu) hasil pelindian pada ukuran partikel -120 mesh berada pada rentang 22.4–28.27 ppm., sedangkan pada ukuran -60 mesh berada pada rentang 23.23–27.92 ppm. Secara umum, kedua variasi ukuran partikel menunjukkan kecenderungan yang relatif sama, namun ukuran -120 mesh cenderung memberikan nilai pelarutan tembaga (Cu) yang sedikit lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pengecilan ukuran partikel meningkatkan kontak antara fase padat dan

larutan pelindi, sehingga memperbesar peluang terjadinya transfer massa antara logam target dan reagen pelindi. Pada sistem hidrometalurgi limbah PCB, pengecilan ukuran (*liberation*) diketahui dapat meningkatkan luas permukaan spesifik material dan membantu memperbesar kontak antara reagen dengan komponen logam yang terdapat pada matriks PCB (Park et al. 2021; Mokhlis et al. 2021). Namun demikian, peningkatan luas permukaan tidak selalu menghasilkan peningkatan pelindian secara proporsional karena logam pada PCB sering kali masih terikat di dalam matriks resin, fiberglass, maupun struktur komposit lainnya sehingga membatasi akses reagen terhadap logam target (Li et al. 2022; Oke & Potgieter. 2024).

Recovery tembaga (Cu) yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 8.81 wt.% untuk ukuran partikel -120 mesh dan 8.71 wt.% untuk ukuran partikel -60 mesh. Nilai tersebut masih lebih rendah dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan sistem pelindian berbasis glycine. Mokhlis et al. (2021) melaporkan bahwa pelindian tembaga (Cu) dari limbah PCB menggunakan glycine sebagai agen pengompleks mampu mencapai ekstraksi sebesar 92.8 wt.% pada kondisi optimum. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas pelindian tembaga (Cu) sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi yang digunakan, termasuk konsentrasi reagen, waktu pelindian, rasio padatan terhadap larutan, serta kondisi oksidasi selama proses berlangsung.

Selain itu, Park et al. (2021) menjelaskan bahwa keberadaan oksigen berperan penting dalam meningkatkan pelarutan tembaga (Cu) dari limbah PCB karena membantu proses oksidasi logam menjadi bentuk ionik yang lebih mudah larut. Pada penelitian ini tidak dilakukan penambahan oksidator eksternal sehingga oksigen terlarut dari udara diduga menjadi satu-satunya sumber oksidasi selama proses pelindian. Kondisi tersebut kemungkinan menyebabkan proses pelarutan tembaga (Cu) berlangsung lebih lambat dan menghasilkan recovery yang relatif rendah.

Rendahnya *recovery* tembaga (Cu) juga dapat dikaitkan dengan karakteristik limbah PCB yang bersifat heterogen. Material PCB tersusun atas campuran logam, resin, fiberglass, dan berbagai komponen non-logam lainnya sehingga sebagian logam masih dapat terperangkap dalam matriks material. Kondisi ini menyebabkan kontak antara larutan pelindi dan logam target menjadi kurang optimal. Penelitian Tyumentseva et al. (2026) menunjukkan bahwa kompleksitas struktur limbah PCB merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi efisiensi ekstraksi logam menggunakan sistem pelindian berbasis glycine. Perbedaan jenis pelindi dapat menghasilkan efisiensi ekstraksi logam yang berbeda karena setiap sistem memiliki mekanisme pelarutan yang spesifik terhadap logam target (Das & Mukherjee. 2025).

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa ukuran partikel yang lebih halus tidak memberikan peningkatan *recovery* yang signifikan. Perbedaan *recovery* antara ukuran -120 mesh dan -60 mesh hanya sebesar 0.10 wt.%, yang mengindikasikan bahwa faktor kimia sistem pelindian kemungkinan lebih dominan dibandingkan faktor ukuran partikel. Temuan serupa dilaporkan oleh Mokhlis et al. (2021), yang menyatakan bahwa mekanisme pelindian tembaga (Cu) menggunakan glycine merupakan proses gas-cair-padat yang kompleks sehingga tidak hanya dipengaruhi oleh luas permukaan partikel, tetapi juga oleh kinetika reaksi dan transfer massa selama proses berlangsung.

Dengan demikian, *recovery* tembaga (Cu) yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem alkali-glycine tanpa penambahan oksidator eksternal telah mampu melarutkan sebagian logam tembaga (Cu) dari limbah PCB. Namun demikian, optimasi lebih lanjut terhadap parameter operasi seperti aerasi, penggunaan oksidator, waktu pelindian, dan konsentrasi reagen masih diperlukan untuk meningkatkan efisiensi proses pada penelitian berikutnya. Meskipun *recovery* tembaga (Cu) yang diperoleh pada penelitian ini masih relatif rendah, hasil yang diperoleh tetap menunjukkan adanya kemampuan sistem alkali-glycine untuk melarutkan sebagian logam

dasar dari limbah PCB. Recovery tembaga (Cu) sebesar 8.81 wt.% pada ukuran partikel -120 mesh dan 8,71% pada ukuran partikel -60 mesh menunjukkan bahwa interaksi antara *glycine* dan tembaga (Cu) telah berlangsung pada kondisi operasi yang digunakan.

Dalam konteks pengolahan limbah PCB, pretreatment tidak selalu ditujukan untuk memperoleh *recovery* logam yang maksimum, tetapi dapat berfungsi sebagai tahap awal untuk mengurangi kandungan logam dasar yang berpotensi mempengaruhi proses *recovery* logam bernilai pada tahap berikutnya. Oke & Potgieter. (2024) menjelaskan bahwa pengolahan limbah PCB umumnya dilakukan secara bertahap melalui kombinasi proses fisik dan hidrometalurgi untuk meningkatkan selektivitas *recovery* logam. Oleh karena itu, keberhasilan pelarutan sebagian tembaga (Cu) pada penelitian ini dapat menjadi indikasi awal bahwa sistem *alkali-glycine* memiliki potensi untuk diterapkan sebagai tahap pretreatment.

Tidak terdeteksinya Au pada penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi pelindian yang digunakan belum mampu mendukung pelarutan logam mulia secara efektif. Huang et al. (2022) melaporkan bahwa *recovery* Au dari limbah PCB dapat mencapai nilai yang tinggi apabila didukung oleh tahapan pretreatment dan sistem pelindian yang sesuai. Selain itu, Hao et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi *glycine* dengan sistem thiosulfate-cobalt mampu meningkatkan pelarutan Au melalui pembentukan kompleks yang lebih stabil. Perbedaan hasil tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan *glycine* tunggal tanpa penambahan agen pendukung maupun oksidator yang memadai kemungkinan belum cukup untuk melarutkan Au pada kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, optimasi sistem pelindian masih diperlukan untuk meningkatkan *recovery* Au pada penelitian selanjutnya

KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi penggunaan sistem *alkali-glycine* sebagai tahap pretreatment pada limbah PCB yang berasal dari modul RAM bekas komputer. Proses pelindian dilakukan menggunakan larutan *glycine* 30 g/L pada pH 11, kecepatan pengadukan 300 rpm, dan waktu pelindian 24 jam dengan variasi ukuran partikel -60 mesh dan -120 mesh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tembaga (Cu) merupakan logam yang paling banyak terlindi dibandingkan logam lainnya. *Recovery* Cu rata-rata yang diperoleh sebesar 8.81 wt.% pada ukuran partikel -120 mesh dan 8.71 wt.% pada ukuran partikel -60 mesh. Perbedaan *recovery* yang relatif kecil menunjukkan bahwa ukuran partikel pada rentang yang digunakan belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas pelindian tembaga (Cu). Sementara itu, emas (Au) tidak terdeteksi pada seluruh larutan hasil pelindian.

Secara teknis, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *alkali-glycine* memiliki kemampuan untuk melarutkan sebagian logam dasar, khususnya tembaga (Cu), namun belum efektif untuk melarutkan logam mulia seperti emas (Au) pada kondisi operasi yang digunakan. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem *alkali-glycine* berpotensi digunakan sebagai tahap awal (*pretreatment*) dalam pengolahan limbah PCB sebelum dilakukan proses *recovery* logam bernilai pada tahap berikutnya. Namun demikian, optimasi lebih lanjut terhadap parameter operasi, seperti penambahan agen pengoksidasi, konsentrasi *glycine*, dan waktu pelindian, masih diperlukan untuk meningkatkan efektivitas proses pelindian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini berlangsung.

Bimbingan tersebut sangat membantu dalam penyelesaian penelitian hingga dapat disusun menjadi artikel ilmiah. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penelitian dan penulisan artikel ini. Kontribusi tersebut sangat berarti dalam mendukung kelancaran seluruh rangkaian kegiatan penelitian. Penulis menyadari bahwa artikel ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Baldé, A. C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., Mcdonald, R., Angelo, E. D., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Deepali, S., Luda, V., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N., ... Luda, V. (2024). *E-WASTE MONITOR* (Issue November).
- Birich, A., Gao, Z., & Vrucak, D. (2023). *Sensitivity of Gold Lixivants for Metal Impurities in Leaching of RAM Printed Circuit Boards*. <https://doi.org/10.3390/met13050969>
- Broeksma, C. P., & Dorfling, C. (2023). Evaluating glycine as an alternative lixiviant for copper recovery from waste printed circuit boards. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 163, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.030>
- Das, D., & Mukherjee, S. (2025). *Studies on leaching characteristics of electronic waste for metal recovery using inorganic and organic acids and base*. <https://doi.org/10.1177/0734242X20931929>
- Duan, H., & Zhu, X. (2022). Environmental Effects Recent advances in recovering technology for recycling gold from waste printed circuit boards : a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(1), 1640–1659. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2056271>
- Godigamuwa, K., & Okibe, N. (2023). *Gold Leaching from Printed Circuit Boards Using a Novel Synergistic Effect of Glycine and Thiosulfate*. <https://doi.org/10.3390/min13101270>
- Hao, J., Wang, X., Wang, Y., Guo, F., & Wu, Y. (2023). Hydrometallurgy Study of gold leaching from pre-treated waste printed circuit boards by thiosulfate - cobalt-glycine system and separation by solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 221(January), 106141. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106141>
- Hao, J., Wang, Y., Wu, Y., & Guo, F. (2020). Resources , Conservation & Recycling Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation & Recycling*, 157(February), 104787. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>
- Huang, Y., Chou, S., & Lo, S. (2022). *Gold recovery from waste printed circuit boards of mobile phones by using microwave pyrolysis and hydrometallurgical methods*. <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00118-x>
- Huy, M., Tien, G., Dong, U., Lee, Y., & Huu, T. (2023). Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from E-waste : A comprehensive review and perspectives. *Minerals Engineering*, 191(April 2022), 107977. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107977>
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*, 57, 64–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004>
- Li, H., Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2022). *Resources , Conservation & Recycling Development of*

- an integrated glycine-based process for base and precious metals recovery from waste printed circuit boards.* 187(September). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106631>
- Mokhlis, H., Daoudi, R. D., & Azzi, M. (2021). *Selective leaching of copper from waste printed circuit boards (PCBs) using glycine as a complexing agent.* 23(1), 90–96. DOI: <https://doi.org/10.30955/gnj.003361>
- Nithya, R., Sivasankari, C., Thirunavukkarasu, A., & Silver, A. (2020). *Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review.* *Environmental Chemistry Letters*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01111-9>
- Oke, E. A., & Potgieter, H. (2024). *Recent chemical methods for metals recovery from printed circuit boards : A review.* *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(3), 1349–1368. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01944-4>
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2014). *Hydrometallurgy The selective leaching of copper from a gold - copper concentrate in glycine solutions.* *Hydrometallurgy*, 150, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.09.005>
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2015). *Hydrometallurgy Gold leaching in cyanide-starved copper solutions in the presence of glycine.* *Hydrometallurgy*, 156, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.05.012>
- Park, Y., Eom, Y., & Yoo, K. (2021). *Leaching of Copper from Waste-Printed Circuit Boards (PCBs) in Sulfate Medium Using Cupric Ion and Oxygen.* <https://doi.org/10.3390/met11091369>
- Tyumentseva, O., Kamunur, K., Mussapyrova, L., & Batkal, A. (2026). *Selective Electrochemical Leaching of Copper from Fragmented Waste Printed Circuit Boards in an Alkaline Sulfate - Glycine Electrolyte.* 1–15. <https://doi.org/10.3390/met16020214>