

Analysis of Gold Concentration and Leaching Efficiency of PCB Waste Using Atomic Absorption Spectroscopy

Maulina Wulansari^{*1}, Yus Rama Denny^{1b}*², Devi Ayu Nur'aini^{1b}³, Moh. Nouvaldy⁴

^{1,3}Pendidikan Fisika, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Banten, Indonesia;


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

⁴E-wasteRJ: Electronic Waste Circular Ecosystem, Jakarta, Indonesia.

Email: yusramadenny@untirta.ac.id

Abstract

Printed circuit board (PCB) waste is a source of valuable metals with high potential for recycling, primarily because it contains relatively high concentrations of gold. This study aims to analyze the gold concentration in the filtrate obtained from leaching PCB waste using atomic absorption spectroscopy (AAS) and to evaluate the leaching efficiency achieved. The study began with sample characterization using Fire Assay and ICP-OES, followed by a pre-leaching process using 65% HNO₃ at 70°C for 60 minutes. The pre-leaching residue was then subjected to leaching using a mixture of 37% HCl and 65% HNO₃ in a 1:3 ratio at 70°C for 90 minutes. The leaching filtrate was analyzed using AAS after dilution: 1 mL of the solution was taken and diluted to 25 mL. The initial characterization results showed that the PCB sample contained 522 ppm of gold from 303.20 grams of PCB sample. AAS analysis revealed a gold concentration of 1.307 ppm in the diluted solution, equivalent to 81,69 ppm in the actual filtrate, with a leaching recovery rate of 34,44%. These results indicate that the leaching process was able to dissolve gold from the PCB matrix into the liquid phase. This study provides preliminary information on the potential for utilizing PCB waste as a source of secondary precious metals through hydrometallurgical methods and can serve as a basis for further research on leaching process optimization and gold recovery.

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

How to Cite:

Wulansari, M., Yus Rama Denny M, Nur'aini, D. A., & Nouvaldy, M. (2026). Analysis of Gold Concentration and Leaching Efficiency of PCB Waste Using Atomic Absorption Spectroscopy. SEARCH: Science Education Research Journal, 4(2), 317–326. <https://doi.org/10.47945/search.v4i2.3003>

Article History:

Received 22 April 2022

Accepted 30 April 2022

Keyword:

Printed circuit board waste,

Aqua regia leaching,

Hydrometallurgy

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah limbah elektronik (*e-waste*) menjadi salah satu permasalahan global yang terus meningkat seiring perkembangan teknologi dan tingginya konsumsi perangkat elektronik masyarakat global yang sangat cepat dalam dua dekade terakhir. Berdasarkan laporan *The Global E-waste Monitor 2024*, jumlah limbah elektronik dunia mencapai 62 juta ton pada tahun 2022 dan diperkirakan akan terus meningkat hingga 82 juta ton pada tahun 2030, sementara sekitar 22,3% yang berhasil didaur ulang secara formal (ITU & UNITAR, 2024). Limbah elektronik tidak hanya mengandung material berbahaya yang berpotensi mencemari lingkungan, tetapi juga mengandung logam-logam bernilai seperti emas (Au), perak (Ag), tembaga (Cu), dan palladium (Pd) (Forti et al., 2020). Salah satu komponen utama limbah elektronik yang memiliki kandungan logam berharga cukup tinggi berasal dari papan sirkuit (PCB) (Van Yken et al., 2021). Kandungan emas pada PCB digunakan sebagai lapisan konduktor karena memiliki konduktivitas tinggi serta ketahanan korosi yang baik, sehingga *recovery* emas dari limbah PCB menjadi alternatif potensial dalam mendukung pengelolaan limbah elektronik dan pemanfaatan sumber daya logam secara berkelanjutan (Huang et al., 2022). (Rao et al., 2020) melaporkan bahwa kandungan logam pada printed circuit board (PCB)

dapat mencapai 40% berat material, dengan konsentrasi logam mulia jauh lebih tinggi dibandingkan bijih primer yang ditambang secara konvensional.

Printed circuit board (PCB) merupakan komponen utama perangkat elektronik yang berfungsi sebagai media penghantar dan penghubung berbagai komponen elektronik. PCB terdiri dari substrat polimer non-logam yang bersifat isolasi (resin), lapisan logam tipis, lapisan laminasi, dan komponen penyusun elektronik (Rodrigues et al., 2023). Berdasarkan jenis substratnya, PCB bisa diklasifikasikan menjadi tipe FR-4 (tahan api, level 4) dan tipe FR-2 (tahan api, level 2) (Li et al., 2010). Rata-rata PCB terdiri dari 30-35 wt.% logam, 35-42 wt.% bahan tahan panas, dan 24-30 wt.% resin (Kumar et al., 2018). Fraksi logam pada PCB terdiri dari 8-38% Fe, 10-27% Cu, 2-19% Al, 1-3% Pb, 0,3-2% Ni, 200-3000 ppm Ag, 20-1200 ppm Au, dan 10-300 ppm Pd tergantung pada pengikat elektroniknya (Arya & Kumar, 2020). Nilai tersebut menunjukkan bahwa PCB memiliki potensi yang besar sebagai sumber emas sekunder yang dapat dimanfaatkan melalui pendekatan *urban mining*. Selain memberikan nilai ekonomi, pemanfaatan kembali emas dari limbah PCB juga dapat mengurangi ketergantungan terhadap aktivitas penambangan primer yang sering dikaitkan dengan konsumsi energi tinggi, degradasi lingkungan, dan emisi karbon yang besar (Ouro-Salim, 2024).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk proses *recovery* logam emas dari limbah PCB, diantaranya metode pirometalurgi dan hidrometalurgi (Das et al., 2021). Metode pirometalurgi umumnya membutuhkan temperatur tinggi dan konsumsi energi yang besar sehingga berpotensi menghasilkan emisi gas yang berbahaya (Golmohammadzadeh et al., 2022). Sedangkan, metode hidrometalurgi lebih banyak dikembangkan karena memiliki efisiensi pelarutan yang baik, penggunaan energi yang lebih rendah, selektivitas yang lebih baik, serta proses yang lebih sederhana dan mudah dikontrol (Jia et al., 2020). Oleh karena itu, metode hidrometalurgi menjadi salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan dalam penelitian *recovery* logam berharga dari limbah elektronik. Dalam proses hidrometalurgi, tahap pelindian (*leaching*) memegang peranan penting karena menentukan jumlah logam yang berhasil dipindahkan dari fase padat ke fase cair. Salah satu metode hidrometalurgi yang umum digunakan dalam ekstraksi emas adalah pelindian menggunakan aqua regia, yaitu campuran lauran asam klorida (HCL) dan asam nitrat (HNO₃). Aqua regia diketahui mampu melarutkan logam emas melalui pembentukan kompleks kloroaurat yang stabil sehingga sering digunakan dalam proses ekstraksi logam mulia dari limbah elektronik maupun material yang mengandung emas (Rofika & R., 2018).

Penelitian mengenai ekstraksi emas dari limbah PCB menggunakan aqua regia telah banyak dilakukan dengan berbagai variasi kondisi seperti ukuran partikel, waktu *leaching*, temperatur, dan komposisi pelarut. Ukuran partikel yang lebih kecil dikatakan dapat meningkatkan luas permukaan kontak antara sampel padatan dan pelarut. Ini dapat mempercepat kinetika reaksi dan memperpendek jarak difusi reagen ke dalam padatan, sehingga logam lebih mudah dan cepat larut (Asworo & Widwiastuti, 2023). Selain itu, komposisi material PCB yang kompleks menyebabkan hasil *recovery* logam setiap penelitian dapat berbeda secara signifikan. Variasi kandungan logam dasar seperti Cu, Fe, dan Ni pada PCB juga dapat mempengaruhi warna filtrat hasil pelindian serta konsentrasi emas yang terukur pada larutan hasil ekstraksi (Ormuž et al., 2026).

Penelitian terkait *recovery* emas dari limbah PCB telah berkembang cukup pesat, namun sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi *recovery* logam atau tahap lanjutan seperti pemurnian logam emas. Kajian mengenai analisis konsentrasi emas pada filtrat hasil *leaching* sebagai indikator awal keberhasilan proses ekstraksi masih relatif terbatas, khususnya pada penggunaan aqua regia terhadap limbah PCB dengan distribusi ukuran partikel tertentu. Selain itu, pembahasan mengenai karakteristik visual filtrat hasil *leaching* yang berkaitan dengan keberadaan ion logam terlarut juga belum banyak dilakukan secara spesifik. Oleh karena itu, diperlukan analisis

konsentrasi emas yang akurat untuk mengevaluasi efektifitas proses *leaching* emas dari limbah PCB menggunakan aqua regia.

Analisis konsentrasi logam umumnya dilakukan menggunakan metode analisis instrumental seperti *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES) dan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) karena keunggulan sensitivitas, selektivitas, serta biaya operasional yang relatif efisien (Mingkasari et al., 2025). Pada penelitian ini, instrument AAS digunakan untuk mengukur konsentrasi emas yang larut selama proses *leaching* dengan aqua regia. AAS mampu memberikan hasil kuantitatif yang memadai untuk mengetahui kandungan logam pada berbagai sistem hidrometalurgi (Tyassena et al., 2023). Data konsentrasi tersebut selanjutnya menjadi parameter utama sebagai indikator awal keberhasilan ekstraksi emas dari limbah PCB.

Berdasarkan pada studi literatur yang mendalam, terdapat celah penelitian yang perlu diperhatikan. Sebagian besar penelitian melaporkan *recovery* emas atau kondisi optimum pelindian (*leaching*), namun tidak banyak mengintegrasikan hasil analisis konsentrasi emas dalam filtrat dengan perhitungan kadar emas pada sampel PCB dan evaluasi efisiensi pelindian secara utuh. Hal ini menyebabkan hubungan antara jumlah emas yang terlarut, kadar emas dalam sampel, dan efektifitas proses *recovery* belum tergambar secara menyeluruh. Selain itu, perbedaan karakteristik PCB yang digunakan dalam berbagai penelitian menyebabkan hasil yang diperoleh sulit dibandingkan secara langsung.

Penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah penelitian melalui analisis konsentrasi emas pada filtrat hasil *leaching* pada limbah PCB menggunakan aqua regia dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Konsentrasi emas yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung kadar emas dalam sampel PCB dan mengevaluasi efisiensi pelindian yang dicapai. Dengan menghubungkan ketiga parameter tersebut dalam satu kerangka analisis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi awal mengenai potensi penggunaan aqua regia dalam proses ekstraksi emas dari limbah PCB serta menjadi dasar untuk pengembangan penelitian *recovery* logam berharga dari limbah elektronik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan menggunakan metode penelitian kuantitatif yang bertujuan menganalisis konsentrasi emas (Au) pada filtrat hasil *leaching* limbah PCB menggunakan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengendalian kondisi proses *leaching* sehingga konsentrasi emas yang terlarut dapat diamati dan diukur secara langsung. Penelitian yang dilakukan bersifat *preliminary study* yang difokuskan pada evaluasi awal kemampuan *leaching* menggunakan aqua regia terhadap pelarutan emas dari limbah PCB. Data yang diperoleh berupa konsentrasi emas dalam filtrat hasil pelindian, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung kadar emas dalam sampel PCB dan mengevaluasi efisiensi pelindian. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Banten.

Sampel penelitian yang digunakan berupa serbuk limbah PCB RAM yang diperoleh dari perangkat elektronik bekas yang telah melalui proses preparasi mekanis. Sampel dibersihkan dari komponen penyusun non-logam yang tidak diperlukan, kemudian dihancurkan dengan alat penghancur mekanik dan diayak untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Dengan massa sebanyak 5 gram pada setiap percobaan. Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini meliputi asam nitrat (HNO₃) 65%, asam klorida (HCL) 37%, serta aquades. HNO₃ yang digunakan pada tahap pre-*leaching* berguna untuk melarutkan kandungan logam dasar (*base metal*) seperti Cu, Ni, Pb, Zn dan Sn yang terdapat dalam PCB sehingga dapat meningkatkan selektivitas pelarutan logam emas

pada tahap selanjutnya, sedangkan aqua regia yang merupakan campuran HCL dan HNO₃ digunakan sebagai larutan leaching untuk melarutkan emas. Analisis kandungan emas dilakukan menggunakan instrumen *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES) untuk karakterisasi awal sampel dan AAS untuk analisis filtrat hasil leaching. Sebelum proses leaching dilakukan, sampel PCB dikarakterisasi untuk mengetahui kandungan logam yang terdapat dalam sampel. Analisis dilakukan di Laboratorium GeoAssay PT Geoservices menggunakan metode Fire Assay, gravimetri, dan ICP-OES.

Langkah pertama adalah preparasi sampel dengan membongkar PCB bekas secara mekanis untuk memisahkan komponen-komponen yang menempel pada PCB. Kemudian, PCB dihancurkan menggunakan *planitary ball mill* dan *crusher machine* hingga menjadi ukuran yang lebih kecil. Hasil *crushing* lanjut diayak dengan menggunakan ayakan ukuran 60-mesh, untuk memperoleh distribusi ukuran partikel yang seragam. Limbah PCB yang belum lolos ayakan kemudian dihaluskan menggunakan *grinder machine* dan diayak lagi. Hasil pengayakan selanjutnya dicampur sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan dan dihomogenkan. Setelah dicampur, sampel ditimbang sebesar 5 gram untuk percobaan.

Pada tahap pre-leaching, sampel yang telah ditimbang ditambahkan dengan 60 ml larutan HNO₃ 65% dalam gelas beaker. Campuran kemudian dipanaskan pada suhu 70°C sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 300 rpm selama 60 menit. Setelah proses pre-leaching selesai, campuran didinginkan hingga mendekati suhu ruang kemudian disaring menggunakan kertas saring. Residu padat yang diperoleh, dibilas menggunakan aquades kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 2 jam untuk menghilangkan kadar air yang tersisa sebelum sampel digunakan untuk proses leaching berikutnya.

Larutan aqua regia disiapkan sebelum digunakan dengan mencampurkan 5 ml HCL pekat (37%) dan 15 ml HNO₃ pekat (65%) atau dengan rasio volume 1:3 di lemari asam. Total volume 20 ml larutan aqua regia, ditambahkan secara perlahan ke dalam residu hasil pre-leaching yang telah dikeringkan. Gelas beker berisi campuran dipanaskan pada suhu 70°C dan diaduk dengan kecepatan 300 rpm selama 90 menit. Selama proses leaching berlangsung, gelas beker ditutup menggunakan cawan petri untuk meminimalisir kehilangan larutan akibat penguapan. Setelah itu, campuran didinginkan hingga suhu ruang kemudian disaring untuk memisahkan filtrat yang mengandung logam terlarut dari residu padat. Filtrat yang diperoleh, terlebih dahulu diencerkan sebanyak 2,5 kali dengan menambahkan aquades untuk mengurangi keasaman larutan dan meminimalkan efek matriks yang dapat memengaruhi hasil analisis.

Filtrat hasil leaching digunakan sebagai sampel untuk analisis konsentrasi emas. Sebelum dilakukan pengujian, 1 ml larutan hasil pengenceran diambil dan diencerkan hingga 25 ml agar konsentrasi sampel berada dalam rentang kerja instrumen. Hasil pengenceran diuji menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*) di Laboratorium Terpadu Universitas Sultan Ageng Tirtayasa untuk dilakukan analisis konsentrasi Au terlarut. Hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan ppm dan digunakan untuk menentukan konsentrasi emas yang terkandung dalam filtrat hasil leaching. Analisis dilakukan berdasarkan nilai konsentrasi yang diperoleh dari hasil pengujian AAS, dihitung dengan mengalikan hasil pengukuran terhadap pengenceran yang digunakan. Hasil analisis AAS kemudian dibandingkan dengan data karakterisasi awal sampel untuk memastikan bahwa emas yang terkandung dalam PCB berhasil terlarut ke dalam fase cair selama proses leaching.

Konsentrasi aktual emas dalam filtrat dihitung dengan memperhitungkan seluruh faktor pengenceran yang digunakan selama preparasi sampel. Massa emas yang berhasil terlarut dalam filtrat dihitung menggunakan persamaan:

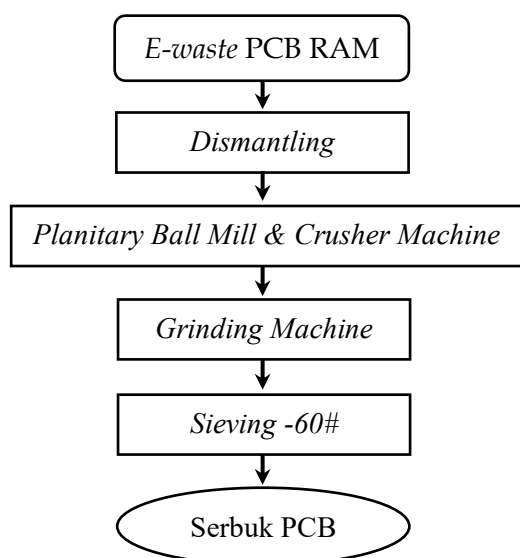
$$m_{Au} = C \times V \quad (1)$$

Dimana m_{Au} adalah massa emas terlarut, C adalah konsentrasi emas dalam filtrat (mg/L), dan V adalah volume filtrat (L) (Muhammad et al., 2020). Persamaan ini berasal dari hubungan konsentrasi dan volume larutan yang digunakan secara luas dalam analisis pelindian logam menggunakan AAS maupun ICP-OES.

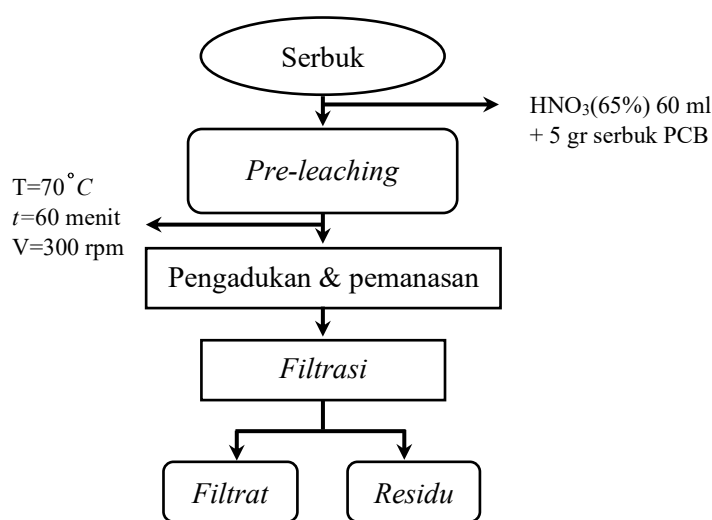
Efisiensi pelindian emas dievaluasi menggunakan nilai recovery yang dihitung berdasarkan perbandingan antara massa emas yang berhasil terlarut ke dalam filtrat dan massa emas awal yang terkandung dalam sampel PCB. perhitungan recovery dilakukan menggunakan persamaan:

$$Recovery(\%) = \frac{m_{Au\ terlarut}}{m_{Au\ awal}} \times 100 \quad (2)$$

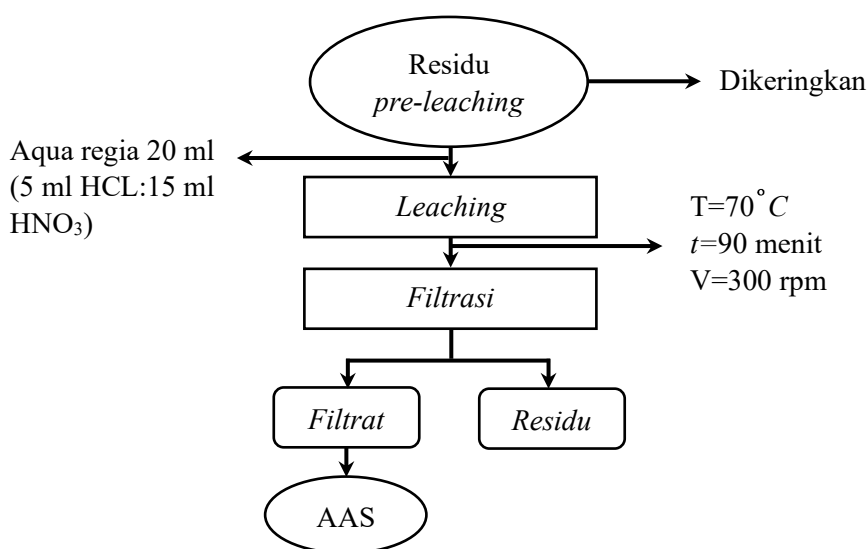
Dimana $m_{Au\ terlarut}$ adalah massa emas yang diperoleh dari hasil analisis AAS dan $m_{Au\ awal}$ adalah massa awal yang dihitung berdasarkan hasil karakterisasi Fire Assay-Gravimetri (M Ilham et al., 2023). Nilai recovery digunakan untuk mengevaluasi efektifitas proses pelindian emas menggunakan aqua regia pada kondisi operasi yang diterapkan.



Gambar 1. Preparasi Sampel



Gambar 2. Pre-leaching



Gambar 3. Leaching

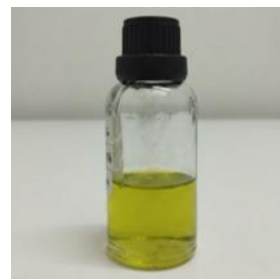
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian hasil dan pembahasan ini menyajikan hasil penelitian yang diperoleh dari proses pelindian emas (Au) pada limbah PCB menggunakan aqua regia. Konsentrasi Au diperoleh melalui pengukuran menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi proses ekstraksi dan mengevaluasi jumlah Au yang berhasil terlarut. Selain itu, hasil yang diperoleh dibahas untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efektifitas pelindian emas dari limbah PCB.

Hasil proses preparasi sampel limbah PCB yang telah melalui proses mekanis dan pengayakan 60-mesh terlihat pada gambar 4. Sampel limbah PCB yang dihasilkan memiliki warna abu-abu dan berbentuk serbuk halus. Sebelum proses leaching, sampel serbuk ini dilakukan karakterisasi awal dengan metode Fire Assay, gravimetri dan ICP-OES sebagai karakterisasi awal untuk mengetahui kandungan logam apa saja yang terdapat dalam serbuk tersebut.



Gambar 4. Serbuk Limbah PCB



Gambar 5. Hasil Leaching Limbah PCB

Tabel 1 memperlihatkan hasil karakterisasi awal yang menunjukkan berbagai logam yang terkandung dalam serbuk PCB.

Tabel 1. Karakterisasi awal ICP-OES sampel PCB

Parameter	Nilai	Satuan
Au (gravimetri)	522	ppm
Ag	668	Ppm
Cu	21,93	%
Ni	3986	ppm
Pb	1362	ppm
Li	68	ppm

Hasil karakterisasi awal menunjukkan bahwa sampel PCB memiliki kandungan emas (Au) sebesar 522 ppm dari 303,20 gram sampel serbuk limbah PCB yang dilakukan pengujian. Nilai tersebut menunjukkan bahwa limbah PCB yang digunakan memiliki potensi sebagai sumber sekunder logam mulia. Selain Au, sampel juga mengandung logam dasar dalam jumlah yang cukup tinggi, terutama Cu sebesar 21,93%, Ni sebesar 3986 ppm, dan logam lainnya. Kandungan logam dasar yang tinggi menunjukkan bahwa emas pada PCB berada dalam matriks yang kompleks sehingga diperlukan tahap pre-leaching untuk mengurangi keberadaan logam dasar sebelum dilakukan proses leaching.

Tahap pre-leaching menggunakan HNO_3 dilakukan untuk mengurangi kandungan logam dasar seperti Cu, Ni, Pb dan Zn. HNO_3 merupakan oksidator kuat yang mampu melarutkan sebagian besar logam dasar, sedangkan emas relatif lebih tahan terhadap pelarutan pada kondisi tersebut. Oleh karena itu, residu hasil pre-leaching diharapkan memiliki kandungan logam mulia yang lebih terkonsentrasi sehingga proses leaching pada tahap berikutnya menjadi lebih selektif. Mekanisme ini sejalan dengan penelitian (Celep et al., 2017) mengenai pelarutan logam dasar menggunakan HNO_3 yang mampu melarutkan sebagian besar logam dasar sehingga meningkatkan selektivitas leaching emas.

Leaching menggunakan campuran HCL- HNO_3 dengan perbandingan 1:3 menghasilkan filtrat berwarna kuning seperti yang terlihat pada gambar 5. Warna tersebut mengindikasikan

terbentuknya logam yang terlarut dalam larutan aqua regia. Selain itu, warna kuning filtrat juga dapat dipengaruhi oleh keberadaan ion logam lain yang ikut terlarut selama proses pelindian. Kemudian, filtrat diencerkan dengan 25 kali pengenceran menggunakan aquades sebelum dilakukan analisis AAS, untuk menyesuaikan rentang konsentrasi sampel dengan kemampuan deteksi instrumen.

Berdasarkan tabel 2, hasil analisis menunjukkan bahwa emas terdeteksi pada filtrat hasil leaching dengan konsentrasi sebesar 1,307 ppm. Diperoleh konsentrasi emas terukur dalam filtrat sebesar 81,69 ppm setelah dilakukan perhitungan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa emas yang terkandung dalam PCB berhasil terlarut ke dalam fase cair selama proses leaching. Keberhasilan pelarutan emas pada penelitian ini dipengaruhi oleh penggunaan aqua regia yang menggunakan campuran HCL dan HNO₃. Dalam sistem aqua regia, HNO₃ berfungsi sebagai oksidator yang mengoksidasi Au menjadi Au³⁺, sedangkan ion klorida dari HCL membentuk kompleks tetrachlorourate [AuCl₄]⁻ yang stabil dalam larutan. Hal ini menyebabkan emas yang berada dalam fase padat dapat berpindah ke fase cair sehingga dapat dideteksi menggunakan AAS.

Tabel 2. Hasil analisis konsentrasi Au menggunakan AAS

Parameter	konsentrasi	Satuan	Keterangan
Au	1,307	ppm	Terdeteksi

Konsentrasi emas terukur sebesar 81,69 ppm menunjukkan bahwa kombinasi pre-leaching HNO₃ dan leaching menggunakan aqua regia mampu melarutkan sebagian emas dari komponen penyusun PCB lainnya. Hasil ini sesuai dengan penelitian (Sheng & Etsell, 2007) yang menyampaikan bahwa aqua regia efektif digunakan untuk melarutkan emas dari limbah PCB karena mampu membentuk HAuCl₄ yang stabil dalam larutan.

Selain itu, penelitian (Putri et al., 2022) menunjukkan bahwa perbandingan HCL: HNO₃ sebesar 1:3 menghasilkan konsentrasi emas terlarut tertinggi dibanding rasio 3:1, 10: 1, dan 1:10, yaitu sebesar 23,77 mg/L. penelitian ini juga menggunakan rasio 1:3 sehingga hasil yang diperoleh mendukung hasil penelitian tersebut bahwa HNO₃ dalam aqua regia mampu meningkatkan proses oksidasi emas selama leaching.

Efisiensi pelindian dievaluasi menggunakan nilai recovery yang dihitung berdasarkan perbandingan antara massa emas terlarut dalam filtrat dan massa emas awal yang terkandung dalam sampel PCB. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa proses pelindian mampu melarutkan 34,44% emas yang terkandung dalam sampel PCB. Keberhasilan proses ini berkaitan dengan kemampuan asam nitrat (HNO₃) sebagai oksidator kuat yang mengoksidasi emas menjadi ion Au³⁺, sedangkan ion klorida dari asam klorida (HCL) membentuk kompleks tetrachloroaurate (AuCl₄⁻) yang stabil dalam larutan. Pembentukan kompleks tersebut mendorong perpindahan emas dari fase padat ke fase cair sehingga meningkatkan ekstraksi. Warna kuning yang diamati pada filtrat hasil pelindian mengindikasikan keberadaan kompleks kloroaurat yang umum terbentuk selama proses pelarutan emas menggunakan media berbasis klorida. Ini menunjukkan bahwa sebagian emas dalam matriks PCB berhasil terlarut ke dalam larutan selama proses pelindian berlangsung.

Presentase recovery emas yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 34,44% yang menunjukkan bahwa belum seluruh emas yang terkandung dalam sampel PCB berhasil terlarut selama proses pelindian. Recovery relatif rendah tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Pertama, rasio aqua regia yang digunakan mungkin belum memberikan kondisi optimum untuk melarutkan seluruh emas yang berada dalam matriks PCB. Meskipun perbandingan HCL-HNO₃ sebesar 1:3 digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini, efektivitas pelindian emas dipengaruhi oleh komposisi larutan, karakteristik sampel, serta interaksi antara logam mulia dan logam dasar yang masih tersisa. Kedua, waktu pelindian 90 menit mungkin belum cukup untuk melarutkan seluruh emas yang terdapat pada residu hasil *pre-leaching*. Proses pelindian emas merupakan proses yang dikendalikan oleh reaksi kimia dan perpindahan massa, sehingga waktu kontak yang lebih

lama dapat meningkatkan peluang terjadinya pelarutan emas hingga mencapai kondisi yang lebih optimum. Ketiga, kehilangan emas selama proses filtrasi juga berpotensi menurunkan proses recovery. Sebagian partikel halus yang masih mengandung emas dapat tertinggal pada media saring atau tetap berada pada residu padat sehingga tidak seluruh emas berpindah ke dalam filtrat yang dianalisis menggunakan AAS. Selain itu, ukuran partikel sampel juga memengaruhi efisiensi pelindian. Partikel yang relatif kasar memiliki luas permukaan kontak yang lebih kecil sehingga penetrasi larutan aqua regia menjadi kurang optimal dibanding partikel berukuran halus.

Berdasarkan hasil tersebut, peningkatan recovery emas pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan melalui optimasi rasio aqua regia, waktu pelindian, ukuran partikel, serta evaluasi tahapan filtrasi untuk meminimalkan kehilangan emas selama proses pemisahan padatan dan filtrasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan proses leaching menggunakan aqua regia (HCL-HNO₃) mampu melarutkan emas yang terkandung dalam limbah PCB ke dalam fase cair. Analisis kandungan emas hasil leaching dapat terdeteksi melalui *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Berdasarkan hasil analisis, konsentrasi emas aktual pada filtrat hasil pelindian sebesar 81,69 ppm dengan presentase recovery sebesar 34,44%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode leaching yang digunakan dapat mengekstraksi emas dari komponen penyusun PCB. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah PCB memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber logam mulia sekunder melalui metode hidrometalurgi. Penggunaan karakterisasi awal sampel dan analisis AAS memberikan informasi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan proses leaching emas dari limbah elektronik. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada suatu kondisi dan satu kali pengujian, sehingga belum dapat digunakan untuk menentukan kondisi optimum proses leaching. Penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan variasi parameter proses, seperti; rasio aqua regia, suhu, waktu leaching, serta pengulangan percobaan diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai efisiensi leaching dan potensi recovery emas dari limbah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, masukan serta dukungan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Laboratorium Terpadu Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah memfasilitasi kegiatan sintesis, preparasi sampel, serta pengujian *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Selain itu, penulis menyampaikan apresiasi kepada tim E-wasteRj yang telah memberika masukan, arahan, serta pendampingan sebagai mentor selama penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan Laboratorium Terpadu serta semua pihak yang telah mendukung dan membantu penulis dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Arya, S., & Kumar, S. (2020). E-waste in India at a glance: Current trends, regulations, challenges and management strategies. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122707. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122707>
- Asworo, R. Y., & Widwastuti, H. (2023). Pengaruh Ukuran Serbuk Simplisia dan Waktu Maserasi terhadap Aktivitas Antioksidan Ekstrak Kulit Sirsak. *Indonesian Journal of Pharmaceutical Education*, 3(2). <https://doi.org/10.37311/ijpe.v3i2.19906>

- Celep, O., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2017). *A Preliminary Study on Nitric Acid Pre-treatment of Refractory Gold/Silver Ores*.
- Das, D., Mukherjee, S., & Chaudhuri, M. G. (2021). Studies on leaching characteristics of electronic waste for metal recovery using inorganic and organic acids and base. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 39(2), 242–249. <https://doi.org/10.1177/0734242X20931929>
- Forti, V., Baldé, C., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global E-waste monitor 2020*. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf
- Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., Jong, B., Pozo-Gonzalo, C., & Banerjee, P. C. (2022). Current challenges and future opportunities toward recycling of spent lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112202>
- Huang, Y.-F., Chou, S.-L., & Lo, S.-L. (2022). Gold recovery from waste printed circuit boards of mobile phones by using microwave pyrolysis and hydrometallurgical methods. *Sustainable Environment Research*, 32(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00118-x>
- ITU, & UNITAR. (2024). *The Global E-waste Monitor 2024*. ITU. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Publications/The-Global-E-waste-Monitor-2024.aspx>
- Jia, L., Huang, J., Ma, Z., Liu, X., Chen, X., Li, J., He, L., & Zhao, Z. (2020). Research and development trends of hydrometallurgy: An overview based on Hydrometallurgy literature from 1975 to 2019. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(11), 3147–3160. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65450-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65450-4)
- Kumar, A., Holuszko, M. E., & Janke, T. (2018). Characterization of the non-metal fraction of the processed waste printed circuit boards. *Waste Management*, 75, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.010>
- Li, J., Duan, H., Yu, K., Liu, L., & Wang, S. (2010). Characteristic of low-temperature pyrolysis of printed circuit boards subjected to various atmosphere. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 810–815. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.011>
- M Ilham, Nurhawaisyah, S. R., & Bakri, S. (2023). ANALISIS WAKTU PELINDIAN TERHADAP PELARUTAN LOGAM Au DALAM BIJIH EMAS DENGAN PROSES HIDROMETALURGI. *Jurnal Aneka Tambang*, 1(2), 43–47. <https://doi.org/10.33096/jat.v1i2.347>
- Mingkasari, M., Najia, R. S., Pambudi, R. I., Primaswari, C. S., Saputri, I. D., Salma, D. A., & Salsabila, V. S. (2025). *Tinjauan Sistematis Peningkatan Kelarutan Sampel dalam Analisis Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) pada Matriks Kompleks: Studi Literatur 2015–2025*.
- Muhammad, I., Triantoro, A., & Novianti, Y. S. (2020). Optimasi Kondisi Pelarutan Logam Au Dalam Endapan Placer Dengan Proses Hidrometalurgi. *Jurnal Geomine*, 7(3), 162. <https://doi.org/10.33536/jg.v7i3.465>
- Ormuž, J. K., Žmak, I., & Čurković, L. (2026). Selective Gold Recovery from Waste Electronics: A Speciation-Based Recycling Approach. *Materials*, 19(3), 538. <https://doi.org/10.3390/ma19030538>
- Ouro-Salim, O. (2024). Urban mining of e-waste management globally: Literature review. *Cleaner Waste Systems*, 9, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100162>
- Putri, R. R. D. A., Pangestu, D., & Khairunnisa, D. C. (2022). Pengaruh Variabel Solvent dan Waktu Leaching terhadap Konsentrasi Emas Terlarut pada PCB Handphone. *Fluida*, 15(1), 30–37. <https://doi.org/10.35313/fluida.v15i1.3458>

- Rao, M. D., Singh, K. K., Morrison, C. A., & Love, J. B. (2020). Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste. *RSC Advances*, 10(8), 4300–4309. <https://doi.org/10.1039/C9RA07607G>
- Rodrigues, C. F., Blaga, L., & Klusemann, B. (2023). Friction riveting of FR4 substrates for printed circuit boards: Influence of process parameters on process temperature development and joint properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4639–4649. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.092>
- Rofika, F., & R., T. A. (2018). PROSES HIDROMETALURGI MENGGUNAKAN PELARUT AQUA REGIA PADA RECOVERY LOGAM EMAS (Au) LIMBAH ELEKTRONIK PCB HP. *JURNAL ENVIROTEK*, 9(1). <https://doi.org/10.33005/envirotek.v9i1.1045>
- Sheng, P. P., & Etsell, T. H. (2007). Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 25(4), 380–383. <https://doi.org/10.1177/0734242X07076946>
- Tyassena, F. Y. P., Prameswara, G., & Suherman, A. F. (2023). Studi Pengaruh Konsentrasi Solvent Dan Kondisi Operasi Terhadap Persen (%) Recovery Nikel Pada Proses Atmospheric Leaching Ore Laterite Asal Morowali Dengan Asam Sulfat. *Journal of Chemical Process Engineering*, 8(1), 49–54. <https://doi.org/10.33536/jcpe.v8i1.1761>
- Van Yken, J., Boxall, N. J., Cheng, K. Y., Nikoloski, A. N., Moheimani, N. R., & Kaksonen, A. H. (2021). E-Waste Recycling and Resource Recovery: A Review on Technologies, Barriers and Enablers with a Focus on Oceania. *Metals*, 11(8), 1313. <https://doi.org/10.3390/met11081313>