

Pengendapan Logam Tembaga (Cu) dengan Sistem Kimiawi pada Limbah Luaran Kerja Bengkel Elektronika

Aris Fakhru^a, Alrosyid^a, Mardi Wasono^a, Basuki Rachmat^b,
Dewi Pujiastuti^c

^aDepartemen Ilmu Komputer dan Elektronika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

^bDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

^cDepartemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Corresponding Author: wasonomardi001@gmail.com

Received: 30th September 2025; Revised: 08st June 2025; Accepted: 18th May 2026;

Available online: 05th June 2026; Published regularly: July 2026

Abstract

Electronics workshop practicums and undergraduate final projects conducted in educational laboratories generate liquid waste containing high concentrations of copper (Cu). This wastewater is acidic, corrosive, and classified as hazardous and toxic waste (B3), posing potential risks to laboratory personnel, equipment, and the environment if not properly managed. A simple and widely applied method for reducing heavy metal concentrations in wastewater is chemical precipitation using alkaline reagents; however, the effectiveness of the precipitating agent strongly depends on wastewater characteristics and operational conditions.

This study aimed to optimize the precipitation of copper (Cu) from wastewater generated by printed circuit board (PCB) etching processes in an electronics workshop and to compare the performance of sodium hydroxide (NaOH) and calcium hydroxide [Ca(OH)₂] as precipitating agents. Batch experiments were conducted at room temperature with variations in contact time, mixing conditions, and precipitant dosage. Dissolved copper concentrations were determined using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS).

The results demonstrate that NaOH provides significantly higher copper removal efficiency than Ca(OH)₂. From an initial copper concentration of approximately 2,381 mg/L, precipitation using NaOH without mechanical mixing reduced the Cu concentration to about 19.765 mg/L at an optimum contact time of 10 hours. In the dosage optimization experiments with mixing, the addition of 5 g NaOH achieved the lowest residual copper concentration, approximately 1.67 mg/L. In contrast, Ca(OH)₂ under comparable contact time conditions resulted in substantially higher residual copper concentrations, indicating lower effectiveness for the tested wastewater matrix.

Based on these findings, it can be concluded that the research objective was achieved, namely identifying the optimum conditions for copper precipitation from electronics workshop wastewater. Sodium hydroxide (NaOH) was proven to be more effective than calcium hydroxide [Ca(OH)₂] and has strong potential as a simple, low-cost method for managing hazardous liquid waste in educational laboratories to enhance laboratory safety and environmental compliance.

Key Words: copper; hydroxide precipitation; PCB etching wastewater; AAS; hazardous waste (Limbah B3)

Abstrak

Praktikum bengkel elektronika dan kegiatan tugas akhir mahasiswa di laboratorium pendidikan menghasilkan limbah cair yang mengandung logam berat tembaga (Cu) dengan konsentrasi tinggi, bersifat asam dan korosif, serta termasuk dalam kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Limbah ini berpotensi menimbulkan risiko terhadap keselamatan personel laboratorium dan pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Salah satu metode yang sederhana dan banyak digunakan untuk menurunkan kadar logam

berat dalam limbah cair adalah presipitasi kimia menggunakan basa alkali, namun efektivitas bahan pengendap sangat bergantung pada karakteristik limbah dan kondisi operasional.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pengendapan logam tembaga (Cu) dari limbah cair hasil proses etsa papan rangkaian tercetak (PCB) pada bengkel elektronika menggunakan metode presipitasi hidroksida, serta membandingkan kinerja natrium hidroksida (NaOH) dan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] sebagai bahan pengendap. Penelitian dilakukan dengan metode uji batch pada suhu ruang dengan variasi waktu kontak, pengadukan, dan dosis bahan pengendap. Konsentrasi tembaga terlarut dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan NaOH menghasilkan efisiensi pengendapan Cu yang lebih tinggi dibandingkan Ca(OH)₂. Dari konsentrasi awal tembaga sekitar 2.381 mg/L, penggunaan NaOH tanpa pengadukan mampu menurunkan kadar Cu hingga sekitar 19,765 mg/L pada waktu kontak optimum 10 jam. Pada variasi dosis dengan pengadukan, penambahan 5 gram NaOH menghasilkan kadar residu tembaga terendah, yaitu sekitar 1,67 mg/L. Sebaliknya, penggunaan Ca(OH)₂ pada kondisi waktu kontak yang sepadan menghasilkan kadar Cu residu yang lebih tinggi.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian tercapai, yaitu diperolehnya kondisi optimum pengendapan tembaga dari limbah bengkel elektronika. Natrium hidroksida (NaOH) terbukti lebih efektif dibandingkan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] dan berpotensi diterapkan sebagai metode sederhana dan berbiaya rendah dalam pengelolaan limbah cair B3 di laboratorium pendidikan.

Kata Kunci: Limbah Berbahaya (B3); Pengelolaan limbah Laboratorium, Proses Kimia, Tembaga (Cu), Keselamatan dan Kesehatan Kerja Laboratorium (K3L)

PENDAHULUAN

Kegiatan praktikum perancangan prototipe elektronika di laboratorium pendidikan umumnya melibatkan proses etsa papan rangkaian tercetak (printed circuit board/PCB) menggunakan larutan asam oksidatif, seperti campuran H₂O₂, HCl, dan air, untuk melarutkan lapisan tembaga (Cu) pada substrat FR-4. Proses tersebut menghasilkan limbah cair dengan kandungan tembaga terlarut yang tinggi, bersifat asam dan korosif, serta diklasifikasikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (Limbah B3). Apabila tidak dikelola secara memadai, limbah ini berpotensi menimbulkan risiko terhadap keselamatan personel laboratorium, kerusakan peralatan, serta pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang praktis, andal, berbiaya rendah, dan sesuai untuk skala laboratorium pendidikan.

Presipitasi kimia menggunakan basa alkali merupakan salah satu teknologi yang paling luas diterapkan untuk menghilangkan logam berat dari limbah cair, khususnya pada konsentrasi tinggi. Metode ini bekerja dengan mengubah ion logam terlarut menjadi senyawa hidroksida yang sukar larut sehingga dapat dipisahkan sebagai endapan (Barakat, t.t.; Fu dan Wang, 2011; Pohl, 2020; Qasem dkk., 2021; Liu dkk., 2023). Dibandingkan metode lanjutan seperti adsorpsi atau membran, presipitasi alkali dinilai lebih sederhana dan ekonomis untuk aplikasi skala kecil.

Pada sistem tembaga, efektivitas presipitasi hidroksida sangat dipengaruhi oleh pH larutan karena adanya spesiasi Cu²⁺, CuOH⁺, Cu(OH)₂ (s), dan kompleks hidroksida lainnya. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa presipitasi Cu paling efektif terjadi pada kondisi agak basa, umumnya pada rentang pH 8–9,5, di mana kelarutan Cu(OH)₂ mencapai nilai minimum (Ayres dkk., 1994; Dirkse, 1994; Cuppett dkk., 2006; Baltpurvins dkk., 1996; Rohana dkk., 2020). Namun demikian, karakteristik matriks limbah seperti keberadaan ion klorida, sisa oksidator, serta agen pengompleks dapat meningkatkan kelarutan semu tembaga atau menyebabkan pelarutan ulang endapan, sehingga memengaruhi efisiensi proses (Fu dan Wang, 2011; Shi dkk., 2022).

Natrium hidroksida (NaOH) dan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] merupakan basa yang paling umum digunakan dalam presipitasi logam berat. NaOH memiliki kelarutan tinggi dan mampu mengendalikan pH secara cepat, sedangkan Ca(OH)₂ relatif lebih murah tetapi memiliki kinetika pelarutan yang lebih lambat

(Jiang dkk., 2008; Hu dkk., 2017). Perbedaan karakteristik tersebut dapat menghasilkan kinerja pengendapan yang berbeda, bergantung pada kondisi operasional dan sifat limbah.

Dalam konteks Indonesia, limbah cair hasil proses etsa PCB dan limbah kimia laboratorium lainnya diatur dalam kerangka regulasi pengelolaan Limbah B3 yang mewajibkan upaya pengurangan risiko melalui pengolahan yang tepat sebelum pembuangan atau pengelolaan lanjutan (Mova dan Dyah Paramita, 2018; Government Regulation, 1994). Bagi laboratorium pendidikan, penerapan presipitasi alkali sederhana dapat menjadi langkah awal yang efektif untuk menurunkan kadar Cu terlarut serta mendukung keselamatan dan kesehatan kerja laboratorium (K3L).

Meskipun berbagai penelitian telah membahas presipitasi tembaga dari limbah industri, kajian yang secara khusus mengevaluasi limbah etsa PCB dari laboratorium pendidikan dengan keterbatasan operasional, seperti pengadukan minimal dan variasi dosis sederhana, masih terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian terkait penerapan metode presipitasi yang pragmatis dan mudah direplikasi di lingkungan laboratorium pendidikan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas natrium hidroksida (NaOH) dan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] dalam mengendapkan logam tembaga (Cu) dari limbah cair praktikum bengkel elektronika, menganalisis pengaruh waktu kontak dan dosis bahan pengendap terhadap konsentrasi Cu residu, serta menentukan kondisi operasional yang paling sesuai untuk diterapkan pada skala laboratorium pendidikan.

BAHAN DAN METODE

Sumber dan Karakterisasi Limbah

Limbah cair hasil proses etsa PCB yang bersifat asam diperoleh dari kegiatan praktikum mahasiswa di bengkel elektronika. Larutan etsa terdiri atas campuran hidrogen peroksida (H₂O₂), asam klorida (HCl), dan air dengan perbandingan volume sekitar 5:20:70. Limbah tersebut mengandung tembaga (Cu) terlarut dengan konsentrasi awal sekitar 2.381 mg/L berdasarkan hasil analisis Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS).

Sampel limbah dikumpulkan dan disimpan dalam wadah yang kompatibel secara kimia. Sebelum analisis, limbah diambil sebagai sub-sampel ke dalam tabung reaksi yang telah dicuci menggunakan larutan asam dan dibilas dengan air deion untuk mencegah kontaminasi. Contoh larutan limbah dan sub-sampel analisis ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Larutan etsa limbah dan sampel dalam tabung reaksi

Reagen dan Peralatan

Bahan pengendap yang digunakan adalah natrium hidroksida (NaOH) dalam bentuk pelet kualitas analitik dan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] dalam bentuk serbuk. Air deion digunakan untuk pelarutan dan pengenceran reagen.

Pengukuran konsentrasi tembaga dilakukan menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer tipe flame AAS, merek Perkin Elmer, model 3110, yang dilengkapi dengan lampu katoda berongga (hollow cathode lamp) khusus tembaga. Pengadukan, apabila diterapkan, dilakukan menggunakan pengaduk magnet (magnetic stirrer). Penimbangan bahan pengendap dilakukan menggunakan neraca digital dengan ketelitian $\pm 0,001$ g. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2 hingga Gambar 4.



Gambar 2. *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)* untuk pengukuran Cu



Gambar 3. Pengaduk magnet (*magnetic stirrer*) untuk percobaan pengadukan



Gambar 4. Neraca digital untuk penimbangan bahan pengendap

Prosedur Presipitasi

Percobaan dilakukan menggunakan metode uji batch pada suhu ruang. Untuk seri presipitasi menggunakan NaOH, sejumlah NaOH ditambahkan ke dalam limbah cair dan dibiarkan bereaksi tanpa pengadukan mekanik dengan variasi waktu kontak hingga 10 jam. Selain itu, dilakukan percobaan tambahan dengan variasi massa NaOH (termasuk 5g untuk volume limbah yang dikaji) dengan penerapan pengadukan menggunakan pengaduk magnet.

Sebagai pembanding, presipitasi menggunakan Ca(OH)_2 dilakukan dengan prosedur dan kondisi yang sepadan, meliputi variasi waktu kontak dan dosis bahan pengendap. Setelah waktu kontak tertentu, sampel diambil untuk analisis konsentrasi Cu terlarut.

Metode Analitik (*Atomic Absorption Spectrophotometry*)

Konsentrasi tembaga terlarut ditentukan menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) metode nyala (flame AAS). Pengukuran dilakukan pada panjang gelombang karakteristik Cu sebesar 324,8 nm, dengan gas bahan bakar asetilena dan oksidator udara. Rentang kerja alat disesuaikan dengan konsentrasi Cu dalam sampel; sampel yang berada di luar rentang linear diencerkan menggunakan air deion.

Pengendalian mutu analisis meliputi penggunaan larutan blanko, pengukuran duplikat, serta verifikasi kurva kalibrasi pada setiap batch pengukuran. Spesifikasi dan tampilan alat AAS yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2 serta foto tambahan alat AAS yang disertakan.

Analisis Data

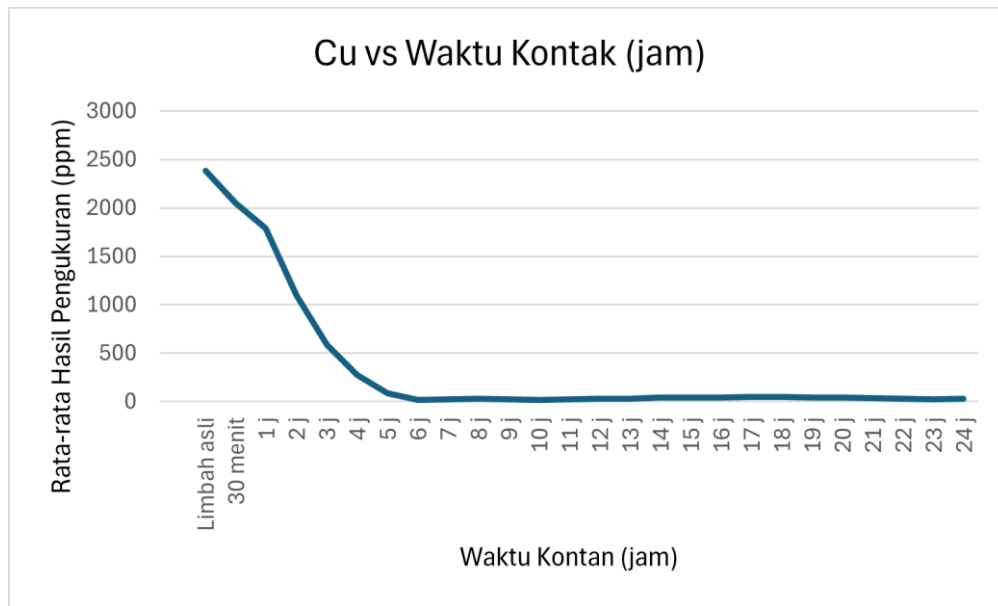
Data konsentrasi Cu residu (mg/L) disajikan secara deskriptif sebagai fungsi waktu kontak dan dosis bahan pengendap. Interpretasi hasil dilakukan dengan mengacu pada hubungan antara pH, kelarutan tembaga(II) hidroksida, serta perbedaan karakteristik bahan pengendap NaOH dan Ca(OH)_2 .

HASIL DAN PEMBAHASAN

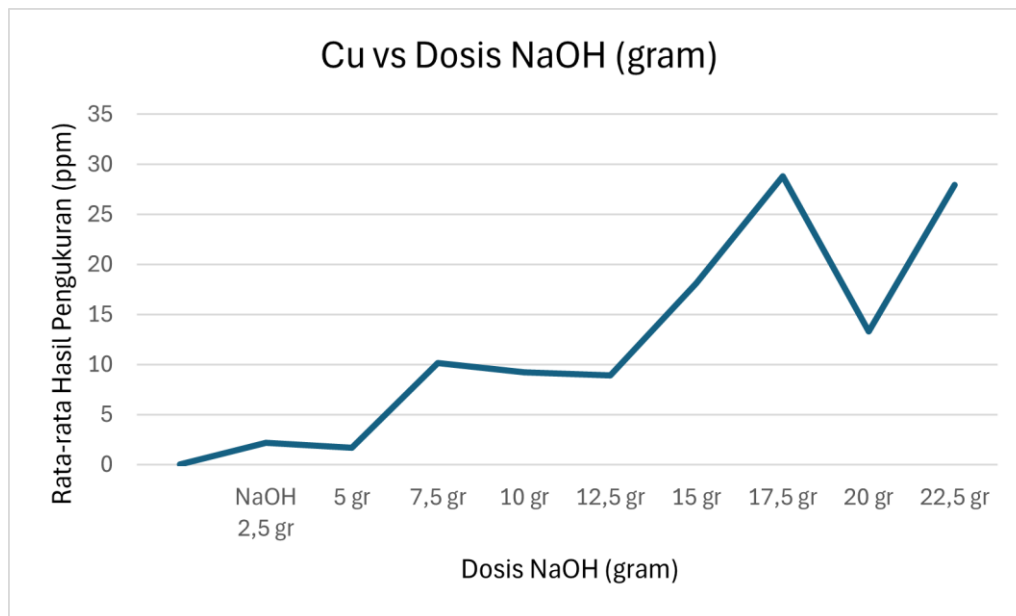
Presipitasi tembaga dari limbah praktikum elektronika berhasil dilakukan melalui presipitasi kimia berbasis basa kuat menggunakan natrium hidroksida (NaOH), dengan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] sebagai pembanding. Konsentrasi tembaga diukur menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Tabel 1 merangkum seri NaOH pada berbagai waktu kontak dan dosis, sedangkan Tabel 2 menyajikan hasil Ca(OH)₂ pada kondisi yang sepadan.

Tabel 1. Hasil presipitasi tembaga menggunakan NaOH

No.	Limbah Asli	Parameter	Hasil Pengukuran (ppm)			Metode
			I	II	III	
1	Limbah asli	Cu	2381,346	2323,511	2439,181	Atomic Absorption Spect.
2	30 menit	Cu	2062,976	2047,55	2039,842	“
3	1 j	Cu	1793,078	1777,655	1800,789	“
4	2 j	Cu	1106,766	1083,632	1099,054	“
5	3 j	Cu	595,795	580,373	580,373	“
6	4 j	Cu	271,918	275,773	271,918	“
7	5 j	Cu	84,458	81,373	86,00	“
8	6 j	Cu	20,729	17,837	19,187	“
9	7 j	Cu	22,464	23,428	20,151	“
10	8 j	Cu	26,898	25,549	26,898	“
11	9 j	Cu	24,585	24,777	23,813	“
12	10 j	Cu	19,765	19,572	19,379	“
13	11 j	Cu	21,886	21,500	22,078	“
14	12 j	Cu	29,019	29,019	29,019	“
15	13 j	Cu	27,669	26,127	26,512	“
16	14 j	Cu	40,393	40,586	40,778	“
17	15 j	Cu	43,863	45,405	44,441	“
18	16 j	Cu	41,357	42,514	40,971	“
19	17 j	Cu	46,755	47,333	47,562	“
20	18 j	Cu	46,562	46,369	46,755	“
21	19 j	Cu	40,200	39,236	40,778	“
22	20 j	Cu	39,815	40,200	40,393	“
23	21 j	Cu	36,152	36,730	35,766	“
24	22 j	Cu	28,826	29,597	28,633	“
25	23 j	Cu	25,934	25,549	25,163	“
26	24 j	Cu	26,127	26,512	26,512	“
27	NaOH 2,5 gr	Cu	2,206	2,185	2,206	“
28	5 gr	Cu	1,672	1,672	1,736	“
29	7,5 gr	Cu	10,068	10,282	10,175	“
30	10 gr	Cu	9,107	9,214	9,321	“
31	12,5 gr	Cu	9,107	8,786	8,893	“
32	15 gr	Cu	18,214	18,000	18,214	“
33	17,5 gr	Cu	29,109	28,682	28,682	“
34	20 gr	Cu	13,300	13,300	13,300	“
35	22,5 gr	Cu	27,827	28,041	28,041	“



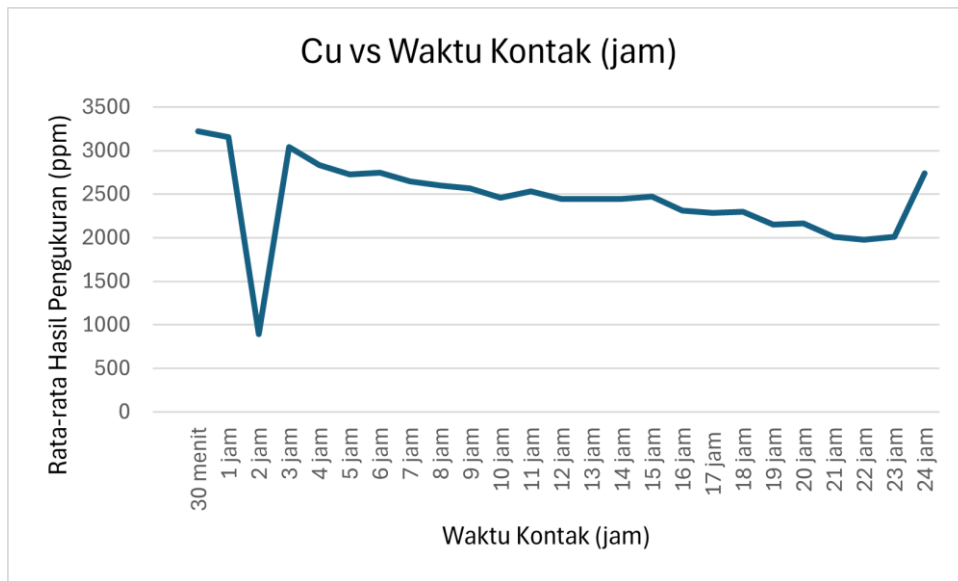
Gambar 5. Konsentrasi Cu residu sebagai fungsi waktu kontak



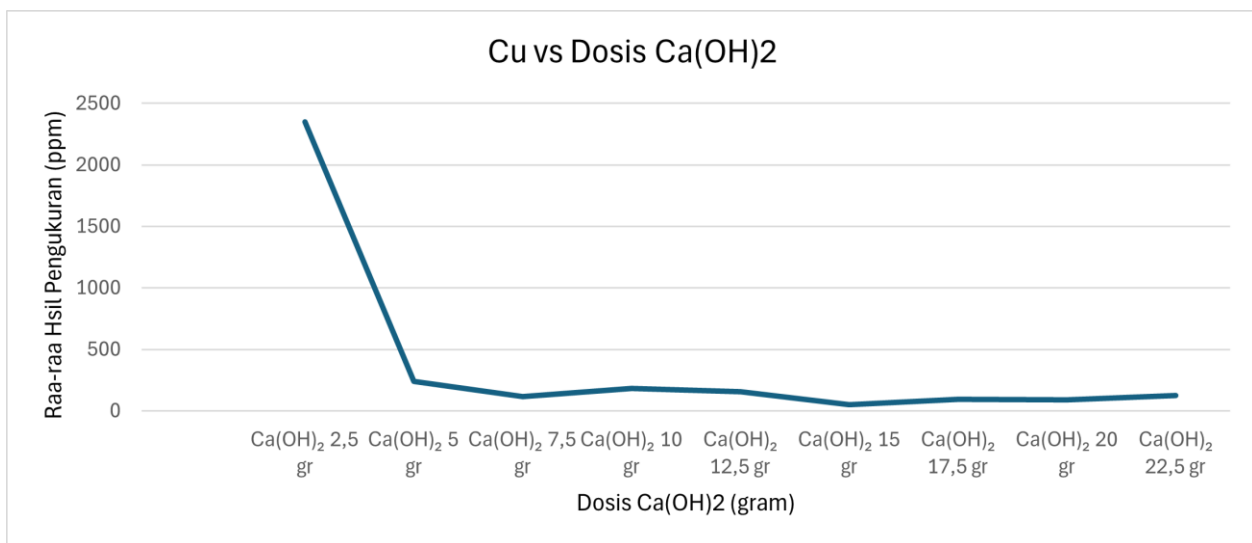
Gambar 6. Dosis NaOH pada proses presipitasi limbah etsa PCB

Tabel 2. Hasil presipitasi tembaga menggunakan Ca(OH)₂ pada kondisi yang sepadan

No.	Kode Sampel	Parameter	Hasil Pengukuran (ppm)			Metode
			I	II	III	
1	30 menit	Cu	3223,785	3206,694	3223,785	Atomic Absorption Spect.
2	1 jam	Cu	3172,513	3138,332	3155,423	“
3	2 jam	Cu	911,176	859,904	906,903	“
4	3 jam	Cu	3035,788	3044,333	3044,333	“
5	4 jam	Cu	2847,791	2830,700	2822,155	“
6	5 jam	Cu	2711,066	2719,611	2753,792	“
7	6 jam	Cu	2753,792	2745,247	2736,702	“
8	7 jam	Cu	2642,703	2668,339	2634,158	“
9	8 jam	Cu	2599,976	2599,976	2599,976	“
10	9 jam	Cu	2548,704	2574,340	2565,795	“
11	10 jam	Cu	2454,706	2437,615	2471,796	“
12	11 jam	Cu	2540,159	2540,159	2505,978	“
13	12 jam	Cu	2437,615	2446,161	2454,706	“
14	13 jam	Cu	2446,161	2429,070	2463,251	“
15	14 jam	Cu	2454,706	2429,070	2446,161	“
16	15 jam	Cu	2488,887	2480,342	2446,161	“
17	16 jam	Cu	2317,981	2300,890	2309,435	“
18	17 jam	Cu	2283,799	2275,254	2300,890	“
19	18 jam	Cu	2300,890	2292,345	2292,345	“
20	19 jam	Cu	2181,255	2138,529	2138,529	“
21	20 jam	Cu	2147,074	2172,710	2172,710	“
22	21 jam	Cu	2001,804	2010,710	2010,349	“
23	22 jam	Cu	1959,077	1967,622	1993,258	“
24	23 jam	Cu	2035,985	2001,804	1993,258	“
25	24 jam	Cu	2728,156	2753,792	2736,702	“
26	Ca(OH) ₂ 2,5 gr	Cu	2358,291	2377,610	2309,993	“
27	Ca(OH) ₂ 5 gr	Cu	234,587	239,417	246,661	“
28	Ca(OH) ₂ 7,5 gr	Cu	113,671	113,671	116,086	“
29	Ca(OH) ₂ 10 gr	Cu	181,288	186,117	186,117	“
30	Ca(OH) ₂ 12,5 gr	Cu	154,724	154,724	154,724	“
31	Ca(OH) ₂ 15 gr	Cu	50,195	52,006	50,195	“
32	Ca(OH) ₂ 17,5 gr	Cu	93,145	91,937	91,937	“
33	Ca(OH) ₂ 20 gr	Cu	88,315	91,937	88,315	“
34	Ca(OH) ₂ 22,5 gr	Cu	119,708	128,160	125,746	“



Gambar 7. Konsentrasi Cu residu sebagai fungsi waktu kontak



Gambar 8. Dosis Ca(OH)₂ pada proses presipitasi limbah etsa PCB

Tren penurunan dan kenaikan kembali konsentrasi Cu selama proses presipitasi ditampilkan secara visual pada Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8. Gambar 5 dan 6 menyajikan diagram konsentrasi Cu residu terhadap waktu kontak dan dosis NaOH, yang memperlihatkan penurunan tajam hingga mencapai nilai minimum pada waktu kontak sekitar 10 jam dan dosis NaOH 5g. Sebaliknya, Gambar 7 dan 8 menunjukkan bahwa presipitasi menggunakan Ca(OH)₂ menghasilkan residu Cu yang secara umum lebih tinggi dan tidak menunjukkan titik minimum yang sejelas NaOH pada rentang kondisi yang diuji. Penyajian dalam bentuk diagram memudahkan identifikasi kondisi optimum dan perbandingan kinerja kedua bahan pengendap.

Kinerja unggul NaOH selaras dengan spesiasi tembaga dan perilaku kelarutan-pH dari $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Pada kondisi agak basa (\approx pH 8–9,5), Cu^{2+} berikatan dengan OH^- membentuk padatan $\text{Cu}(\text{OH})_2$ yang sukar larut ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 \downarrow$), sehingga meminimalkan Cu terlarut. Waktu kontak yang terlalu lama tanpa pengadukan memadai dapat menyebabkan penyimpangan pH lokal dan efek ligan (misalnya klorida dari etsa berbasis HCl atau oksidator sisa seperti H_2O_2) yang memihak spesies Cu berkompleks dan pelarutan ulang sebagian—sesuai dengan kenaikan kembali (rebound) setelah titik optimum 10 jam. Dibandingkan NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ melarut lebih lambat dan kurang lincah dalam pengendalian pH, sehingga lebih sulit mempertahankan titik minimum kelarutan Cu dalam matriks ini; hal ini kemungkinan berkontribusi pada residu yang lebih tinggi pada waktu kontak yang sepadan.

Dari data pengukuran, dengan konsentrasi awal tembaga 2.381,346 ppm, NaOH tanpa pengadukan menurunkan Cu menjadi 2.062,976 ppm pada 30 menit, dan mencapai 19,765 ppm pada 10 jam (kondisi terbaik sebelum pelepasan ulang akibat kejenuhan). Untuk pembanding $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada 10 jam, konsentrasinya 3.223,785 ppm. Pada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 2 jam, nilai terbaik yang diamati adalah 911,176 ppm (Tabel 2). Selanjutnya, ketika pengadukan diterapkan dan dosis pengendap divariasikan, penambahan 5 g NaOH menghasilkan rerata 1.693,33 untuk volume yang dikaji. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa NaOH merupakan pengendap yang lebih efektif pada kondisi yang diuji, khususnya pada kontak 10 jam tanpa pengadukan dan pada dosis 5 g dalam seri optimasi dengan pengadukan.

Dua penyesuaian ringan yang disarankan dari data ini ialah: (i) pengadukan terkendali singkat di awal untuk memastikan keseragaman alkalisasi, dan (ii) pemeriksaan pH sederhana dengan koreksi dosis kecil untuk menjaga kondisi tetap berada pada minimum kelarutan $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Bila target lokasi mensyaratkan < 1 mg/L Cu, dapat dipertimbangkan langkah pemolesan (*polishing*) ringan (misalnya koagulasi-flokulasi atau adsorpsi) setelah presipitasi NaOH tanpa mengubah alur kerja inti..

KESIMPULAN

Dari data dan analisis, waktu pengendapan optimum tanpa perlakuan mekanik adalah 10 jam (rerata 19,572 ppm) menggunakan bahan pengendap natrium hidroksida (NaOH), dengan kalsium hidroksida [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] sebagai pembanding. Dengan variasi dosis pengendap, hasil terbaik diperoleh pada 5 gram NaOH, menghasilkan rerata 1,673 ppm, dan kinerjanya melampaui $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Disarankan melakukan uji pembanding dengan variasi kondisi pengadukan (*stirring/mixing*) dan waktu kontak.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian UGM atas pendanaan melalui Hibah Penelitian Staf Kependidikan dengan Jabatan Fungsional Tertentu (Kontrak No. 4564/UN1.P2/Dit-Lit/PT.01.00/2025), serta kepada Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika (FMIPA), Departemen Kimia (FMIPA) dan Departemen Teknik Mesin (FT) UGM atas fasilitas laboratorium dan dukungan teknis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayres, D.M., Davis, A.P. dan Gietka, P.M., 1994, *Removing Heavy Metals from Wastewater Engineering Research Center Report Removing Heavy Metals From Wastewater*.
- Baltpurvins, K.A., Burns, R.C. dan Lawrance, G.A., 1996, *Heavy metals in wastewater: Modelling the hydroxide precipitation of copper(II) from wastewater using lime as the precipitant*, [Online] 16, tersedia di DOI:10.1016/S0956-053X(97)00014-7.
- Barakat, M.A., t.t., New trends in removing heavy metals from industrial wastewater, *Arabian Journal of Chemistry*, [Online] 4, tersedia di DOI:10.1016/j.arabjc.2010.07.019.
- Cuppett, J.D., Duncan, S.E. dan Dietrich, A.M., 2006, Evaluation of Copper Speciation and Water Quality Factors That Affect Aqueous Copper Tasting Response, *Chemical Senses*, [Online] 31 (7), 689–697, tersedia di DOI:10.1093/chemse/bjl010.

- Dirkse, T.P., 1994, *Copper(II) Oxide and Hydroxide*.
- Fu, F. dan Wang, Q., 2011, Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review, *Journal of Environmental Management*, [Online] 92 (3), 407–418, tersedia di DOI:10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
- Government Regulation, 1994, *Regulation Regarding Hazardous and Toxic Waste Management*.
- Hu, H., Li, X., Huang, P., Zhang, Q. dan Yuan, W., 2017, Efficient removal of copper from wastewater by using mechanically activated calcium carbonate, *Journal of Environmental Management*, [Online] 2031–7, tersedia di DOI:10.1016/j.jenvman.2017.07.066.
- Jiang, S., Fu, F., Qu, J. dan Xiong, Y., 2008, A simple method for removing chelated copper from wastewaters: Ca(OH)₂-based replacement-precipitation, *Chemosphere*, [Online] 73 (5), 785–790, tersedia di DOI:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.010.
- Liu, Y., Wang, H., Cui, Y. dan Chen, N., 2023, Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [Online]. 20 (5). tersedia di DOI:10.3390/ijerph20053885.
- Mova, M. dan Dyah Paramita, A., 2018, *Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Phasing-Out Regulation in Indonesia Final Report (Updated)*.
- Pohl, A., 2020, Removal of Heavy Metal Ions from Water and Wastewaters by Sulfur-Containing Precipitation Agents. *Water, Air, and Soil Pollution*. [Online]. 231 (10). tersedia di DOI:10.1007/s11270-020-04863-w.
- Qasem, N.A.A., Mohammed, R.H. dan Lawal, D.U., 2021, Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*. [Online]. 4 (1). tersedia di DOI:10.1038/s41545-021-00127-0.
- Rohana, S., Yatim, M., Nor, S., Kasmuri, H., Syahjidan, H.N., Shahirazni Mokhtar, N. dan Zainuddin, N.A., 2020, Removing copper, chromium and nickel in industrial effluent using hydroxide precipitation versus sulphide precipitation. *Health Scope*. 54.
- Shi, Y., Zhu, Y., Ma, W., Shi, J., Peng, Q., Lin, Z. dan Lv, H., 2022, Comprehensive investigation on non-volatile and volatile metabolites in four types of green teas obtained from the same tea cultivar of Longjing 43 (*Camellia sinensis* var. *sinensis*) using the widely targeted metabolomics, *Food Chemistry*, [Online] 394, tersedia di DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133501.