

# RECOVERY TEMBAGA DARI LARUTAN TEMBAGA SULFAT MELALUI METODE SEMENTASI MENGGUNAKAN BESI

Kostiawan Sukamto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Kimia, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia

\*E-mail: [kostiawan\\_sukamto@ung.ac.id](mailto:kostiawan_sukamto@ung.ac.id)

Riwayat Article

Received: 18 September 2023; Received in Revision: 26 September 2023; Accepted: 27 September 2023

## Abstract

This study aims to optimize the copper recovery process from copper sulfate solution using the cementation method with iron as the precipitating agent. This method offers an efficient and sustainable solution to address the challenges of copper recovery from copper sulfate solutions, which has become increasingly crucial due to the declining supply of high-grade copper ore. The variables optimized in this research encompass the optimization of stirring speed (50 rpm to 300 rpm), iron addition (0.5 to 3 times the stoichiometric reaction), temperature (30 to 70°C), and reaction time (15 to 120 minutes). The research results indicate that the optimal conditions for copper recovery are achieved at a stirring speed of 200 RPM, iron addition of 2 times the stoichiometric reaction, a temperature of 70°C, and a reaction time of 120 minutes. Under these conditions, the percentage of copper recovery from the copper sulfate solution using the cementation method reaches 99.37%, demonstrating a high level of efficiency in this approach.

Keywords: Recovery, Copper, Iron, Copper Sulfate, Cementation

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat menggunakan metode sementasi dengan menggunakan besi sebagai agen pengendap. Metode ini menawarkan solusi yang efisien dan berkelanjutan dalam mengatasi tantangan recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat, yang menjadi semakin penting dalam menghadapi penurunan pasokan bijih tembaga berkadar tinggi. Variabel yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi optimasi kecepatan pengadukan (50 rpm hingga 300 rpm), optimasi penambahan besi (0,5 hingga 3 kali reaksi stoikiometri), optimasi temperatur (30 hingga 70 °C), dan optimasi waktu reaksi (15 hingga 120 menit). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimal untuk proses recovery tembaga adalah pada kecepatan pengadukan 200 RPM, penambahan besi sebanyak 2 kali reaksi stoikiometri, temperatur 70 °C, dan waktu reaksi selama 120 menit. Pada kondisi ini, persentase recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat menggunakan metode sementasi mencapai 99,37%, menunjukkan efisiensi yang tinggi dalam metode sementasi ini.

Kata Kunci: Recovery, Tembaga, Besi, Tembaga Sulfat, Sementasi

## 1. Introduction

Pasokan bijih tembaga berkadar tinggi yang mudah dieksploitasi telah lama menjadi sumber utama tembaga. Namun, cadangan ini semakin menipis karena kesulitan penambangan bijih berkadar tinggi yang jauh dan tersembunyi. Oleh karena itu, fokus bergeser pada bijih berkadar rendah yang sebelumnya diabaikan. Untuk memenuhi permintaan yang meningkat, industri perlu mengolah bijih berkadar rendah dengan cara efisien (Jena *et al.*, 2022). Pengolahan melalui hidrometalurgi menjadi pilihan menjanjikan karena memungkinkan ekstraksi logam yang lebih efisien melalui larutan cair. Ini membuka peluang baru dalam pemanfaatan sumber daya yang sebelumnya diabaikan. Melalui penelitian dan pengembangan, metode hidrometalurgi menjadi lebih efektif dalam mengatasi tantangan bijih berkadar rendah, memberikan solusi yang berkelanjutan dan menguntungkan secara ekonomis (Harichandan and Mandre, 2021; Shin *et al.*, 2021).

Pendekatan proses hidrometalurgi umumnya melibatkan beberapa langkah kunci, seperti pelarutan bijih tembaga dengan asam atau basa, pemisahan dan pemurnian larutan hasil pelarutan, serta recovery logam dari larutan tersebut (Kamberović *et al.*, 2018). Dalam situasi

ini, penggunaan asam sulfat telah menjadi umum dalam melarutkan tembaga dari bijihnya. Reaksi kimia yang terjadi selama proses pelarutan melibatkan pelepasan ion tembaga dari dalam bijih ke dalam larutan asam sulfat. Pelarutan bijih tembaga menggunakan asam sulfat telah menjadi subjek penelitian yang produktif, dengan upaya untuk memahami kinetika reaksi, mekanisme, dan faktor-faktor yang memengaruhi pelarutan dan recovery tembaga. Ini melibatkan penentuan kondisi operasional yang optimal, seperti suhu, konsentrasi asam sulfat, dan waktu reaksi, yang dapat memaksimalkan ekstraksi tembaga dan meminimalkan efek samping yang tidak diinginkan. Selain itu, upaya untuk mengoptimalkan metode recovery logam dari larutan juga merupakan bagian integral yang tak terpisahkan (Bai *et al.*, 2017; Luo, Wang and Yin, 2018; Subagja, Setiawan and Rhamdani, 2021).

Di dalam upaya untuk mengendapkan tembaga dari larutan tembaga sulfat, terdapat sejumlah alternatif proses yang dapat dilakukan. Beberapa di antaranya mencakup pengendapan tembaga dalam bentuk sulfida atau hidroksida, reduksi menggunakan gas tertentu, dengan cara elektrowinning, serta berbagai pendekatan lainnya (Wang *et al.*, 2022; Wang, Cheng and Xue, 2022). Walaupun ada berbagai macam pendekatan dalam variasi metodenya, secara keseluruhan, proses yang telah mengalami perkembangan besar dalam pengendapan tembaga dari larutan adalah metode sementasi dengan besi. Terutama, metode ini bermanfaat untuk larutan yang memiliki kadar tembaga yang rendah. (Shishkin *et al.*, 2018).

Pengendapan tembaga dalam bentuk sulfida atau hidroksida melibatkan reaksi kimia yang mengarah pada pembentukan padatan tembaga. Namun, metode-metode ini memiliki keterbatasan dalam efisiensi pengendapan, terutama ketika kandungan tembaga dalam larutan relatif rendah (Nurtazina, Azhigulova and Uvarov, 2022). Di sisi lain, reduksi menggunakan gas memerlukan kondisi yang sangat terkontrol dan seringkali membutuhkan suhu tinggi, sehingga dapat memengaruhi efisiensi dan skala produksi (Bisztyga-Szklarz *et al.*, 2021). Elektrowinning, yang melibatkan pengendapan logam dengan bantuan arus listrik, umumnya cocok untuk kandungan tembaga yang lebih tinggi, dan kurang efisien atau ekonomis untuk larutan dengan kandungan tembaga yang rendah (Dávila-Pulido *et al.*, 2020).

Oleh karena itu, metode sementasi menggunakan besi telah menjadi pilihan utama dalam mengatasi tantangan pengambilan kembali tembaga dari larutan tembaga sulfat dengan kandungan rendah. Proses ini melibatkan reaksi redoks di antara besi dan tembaga dalam larutan, di mana besi bertindak sebagai agen reduksi yang mengurangi tembaga dari bentuk ioniknya menjadi padatan tembaga. Keunggulan metode sementasi terletak pada relatifnya kemudahan pelaksanaan, biaya yang rendah, dan adaptabilitasnya terhadap larutan dengan kandungan tembaga yang rendah. Dengan demikian, dalam konteks kandungan tembaga rendah, metode sementasi menggunakan besi menawarkan solusi yang menjanjikan untuk recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat, memberikan kontribusi penting terhadap upaya daur ulang logam dan pengurangan limbah industri.

## **2. METHODOLOGY**

### **2.1. Alat dan Bahan**

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi AAS, peralatan gelas, hot plate, thermometer, magnetic stirrer, corong Buchner, dan kertas saring. Bahan baku yang digunakan terdiri dari larutan tembaga sulfat yang diperoleh melalui pelarutan bijih tembaga dari Provinsi Gorontalo, dengan kandungan tembaga 12,72 gram/liter dan besi 1,81 gram/liter. Logam besi yang digunakan dalam metode sementasi adalah besi sekrap.

### **2.2. Prosedur Penelitian**

#### **1. Preparasi sampel**

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini merupakan larutan tembaga sulfat hasil pelarutan dari bijih tembaga yang telah dilakukan sebelumnya. Bijih tembaga yang dilarutkan merupakan mineral adalah mineral sulfida tembaga  $Cu_3AsS_4$  atau yang dikenal sebagai mineral Enargit. Larutan tembaga sulfat hasil pelarutan di ambil sebanyak 600 ml untuk selanjutnya dilakukan proses recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat.

## 2. Recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat

Larutan tembaga sulfat yang berasal dari pelarutan bijih tembaga sebanyak 600 ml dimasukkan ke dalam sebuah wadah kimia berkapasitas 1 liter. Kemudian, larutan ini dipanaskan dengan menggunakan *hot plate* pada berbagai suhu, yaitu 30, 40, 50, 60, dan 70 °C. Selama proses pemanasan dimulai, pengadukan dilakukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan yang bervariasi, yaitu 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 rpm. Setelah suhu yang diinginkan tercapai, besi sekrap ditambahkan ke dalam larutan tembaga sulfat dengan rasio variasi 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; dan 3,0 kali stoikiometri reaksi. Proses ini diamati selama berbagai rentang waktu, yaitu 15, 30, 60, dan 120 menit. Setelah proses selesai, larutan dipisahkan dari endapan tembaga yang terbentuk melalui penyaringan. Untuk menganalisis hasilnya, kandungan besi dan tembaga dalam larutan setelah proses sementasi diukur menggunakan AAS.

## 3. Perhitungan persen recovery tembaga dan persen besi terlarut

Keberhasilan proses recovery tembaga dinyatakan dalam bentuk persentase dari berat tembaga yang terendap, sesuai persamaan berikut:

$$\% \text{ Recovery Cu} = \frac{[\text{Cu}]_P}{[\text{Cu}]_A} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

dimana,  $[\text{Cu}]_P$  adalah jumlah berat tembaga yang mengendap dari larutan tembaga sulfat dan  $[\text{Cu}]_A$  adalah jumlah berat tembaga awal dalam larutan sebelum proses sementasi.

Sementara itu, persentase berat besi yang terlarut menggambarkan perbandingan antara berat besi yang larut dalam larutan tembaga sulfat  $[\text{Fe}]_D$  dan berat total besi sekrap yang dimasukkan ke dalam larutan tembaga sulfat  $[\text{Fe}]_T$ , seperti yang dijelaskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\% \text{ Berat Fe Terlarut} = \frac{[\text{Fe}]_D}{[\text{Fe}]_T} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

## 3. RESULT AND DISCUSSION

### 3.1. Optimasi Kecepatan Pengadukan

Dalam penelitian ini, dampak variabel kecepatan pengadukan terhadap recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat dikaji pada suhu 60 °C dan waktu proses 120 menit, dengan penambahan besi sekrap dalam jumlah yang sama dengan dua kali stoikiometri berdasarkan jumlah besi yang secara teoritis dibutuhkan untuk mengendapkan tembaga sesuai dengan reaksi berikut:

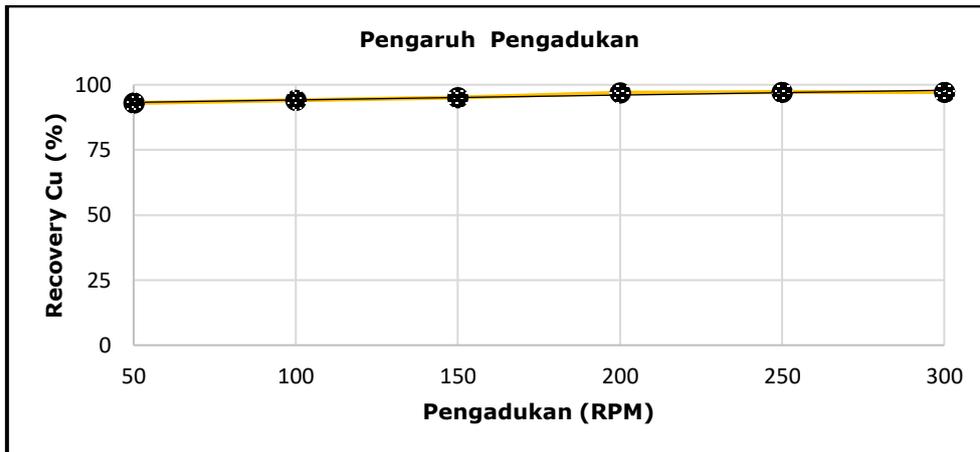


(a) (b)

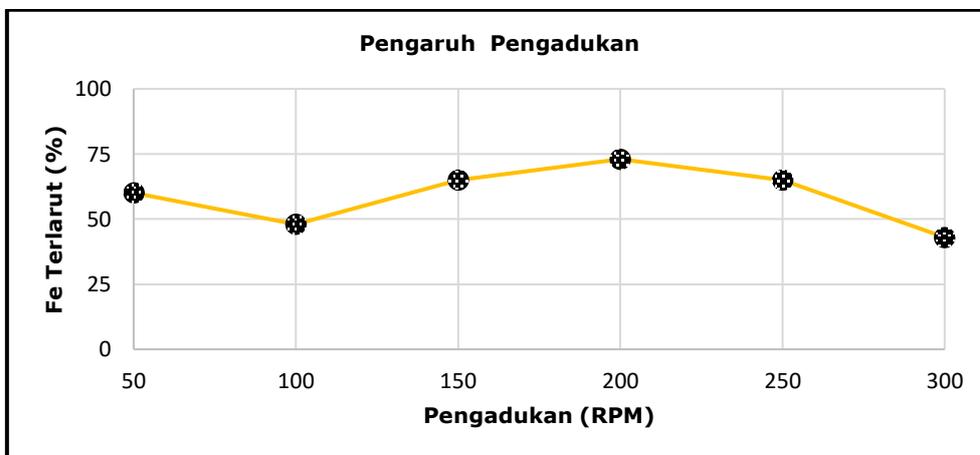
**Gambar 1.** (a) larutan tembaga sulfat hasil pelarutan, (b) tembaga hasil *recovery*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatkan kecepatan pengadukan dari 50 rpm menjadi 300 rpm tidak menghasilkan dampak yang signifikan pada tingkat pengendapan tembaga, sebagaimana terlihat pada Gambar 1.a di bawah ini. Sebaliknya, persentase berat besi cenderung

menurun seiring dengan peningkatan kecepatan pengadukan (Gambar 1.b). Hal ini mengakibatkan peningkatan berat besi yang terlarut sebagai akibat dari reaksi pengendapan tembaga, sebagaimana yang tercermin dalam persamaan reaksi (3).



(a)



(b)

**Gambar 1.** Optimasi kecepatan pengadukan terhadap (a) persen recovery tembaga, (b) persen besi terlarut

Saat kecepatan pengadukan meningkat, tercipta turbulensi dalam larutan yang memungkinkan partikel-partikel besi dan ion tembaga lebih sering bersentuhan. Ini memungkinkan reaksi antara ion tembaga dalam larutan dan partikel-partikel besi terjadi dengan lebih cepat dan efisien. Dalam proses sementasi, partikel-partikel besi bertindak sebagai agen reduksi yang mereduksi ion tembaga dalam larutan menjadi tembaga padat yang terendapkan (Kim, Hong and Jung, 2012). Dengan peningkatan kecepatan pengadukan, partikel-partikel besi memiliki lebih banyak peluang untuk berinteraksi dengan ion tembaga, menghasilkan lebih banyak pengendapan tembaga. Selain itu, sifat kinetika reaksi juga dapat dipengaruhi oleh konsentrasi awal reaktan dalam larutan. Jika konsentrasi tembaga dalam larutan sudah mendekati titik jenuh pengendapan, peningkatan kecepatan pengadukan tidak akan memberikan dampak signifikan pada laju pengendapan tembaga berdasarkan reaksi berikut:



Titik jenuh pengendapan tembaga sulfat dengan besi terjadi ketika produk pengendapan, yaitu tembaga (Cu), tidak lagi dapat larut dalam larutan karena larutannya telah mencapai kelarutan maksimumnya, yang ditentukan oleh nilai KSP untuk  $\text{CuSO}_4$  pada suhu tertentu. Pada titik ini, kelebihan tembaga sulfat akan mengendap sebagai padatan dalam bentuk tembaga padat (Cu).

KSP untuk  $\text{CuSO}_4$  adalah konstanta kesetimbangan yang menunjukkan seberapa banyak ion tembaga dan ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) yang dapat larut dalam larutan.

Sebaliknya, peningkatan kecepatan pengadukan dapat mengurangi periode kontak antara partikel besi dan larutan tembaga sulfat. Dalam situasi ini, efek difusi akan ditingkatkan, sehingga lebih banyak ion besi akan berdifusi dari permukaan partikel besi ke dalam larutan tembaga sulfat. Namun, dengan kecepatan pengadukan yang tinggi, partikel-partikel besi memiliki waktu yang lebih singkat untuk berinteraksi dengan ion tembaga dalam larutan. Hal ini dapat menghambat reaksi antara ion tembaga dan besi, yang pada akhirnya dapat mengurangi kelarutan besi dalam larutan (Shishkin *et al.*, 2018).

### 3.2. Optimasi Penambahan Besi Sekrap

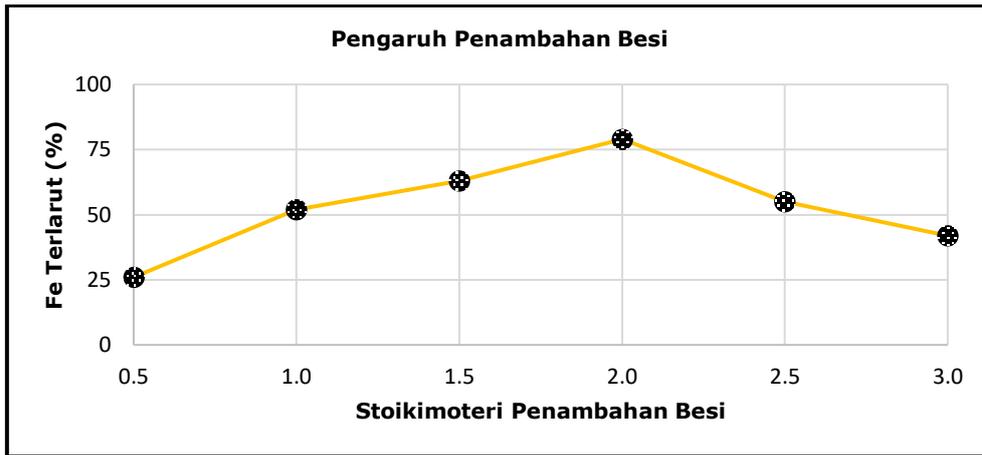
Pengaruh dari penambahan besi sekrap terhadap persentase berat pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat telah diuji pada suhu  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , dengan waktu proses selama 120 menit, kecepatan pengadukan sebesar 200 rpm, dan variasi jumlah besi sekrap dari 0,5 hingga 3 kali stoikiometri reaksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek dari penambahan besi bekas terhadap persentase recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat, pada kisaran antara 0,5 kali stoikiometri hingga 2 kali stoikiometri reaksi, menghasilkan peningkatan persentase berat tembaga yang mengendap, sebagaimana yang dinyatakan dalam reaksi berikut:



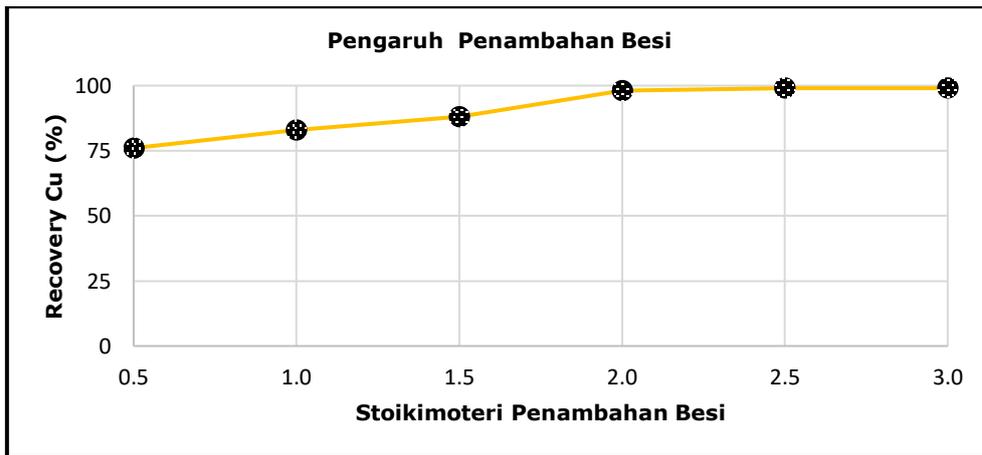
Reaksi (5) menunjukkan bahwa, dua atom besi bereaksi dengan satu molekul tembaga sulfat untuk membentuk endapan tembaga dan besi sulfat dalam bentuk larutan. Perlu diperhatikan bahwa perbandingan stoikiometri besi terhadap tembaga sulfat adalah 2:1. Ini berarti setiap molekul tembaga sulfat membutuhkan dua atom besi untuk mengendapkan satu atom tembaga. Penambahan besi sekrap hingga 2 kali reaksi stoikiometri meningkatkan pengendapan tembaga dengan mengikat ion tembaga dalam larutan. Namun, peningkatan lebih lanjut hingga 3 kali reaksi stoikiometri tidak signifikan karena reaksi sudah mencapai titik jenuh. Peningkatan dalam jumlah besi yang ditambahkan, mulai dari 0,5 hingga 2 kali stoikiometri reaksi, mengakibatkan peningkatan besi terlarut. Akan tetapi, ketika penambahan besi ditingkatkan menjadi 3 kali stoikiometri reaksi, terjadi penurunan berat besi yang terlarut.

Dalam reaksi pengendapan tembaga dari tembaga sulfat dengan besi (reaksi 4), KSP adalah perkalian dari konsentrasi ion tembaga ( $\text{Cu}^{2+}$ ) dan ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pada saat larutan jenuh dalam bentuk ion. Karena satu molekul  $\text{CuSO}_4$  akan memberikan satu ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan satu ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , maka konsentrasi ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) akan sama dengan konsentrasi ion tembaga ( $\text{Cu}^{2+}$ ). Karena konsentrasi ion tembaga ( $\text{Cu}^{2+}$ ) adalah sekitar 0.20 M dan konsentrasi ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) juga adalah sekitar 0.20 M (karena mereka memiliki hubungan yang sama dengan konsentrasi ion tembaga), maka KSP untuk reaksi recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat menggunakan besi yaitu  $4 \times 10^{-2}$  M. Ini berarti pada suhu  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , produk pengendapan tembaga akan mengendap hingga mencapai konsentrasi ini dalam larutan jenuh. Hasil ini merupakan ukuran seberapa besar tembaga dapat larut dalam larutan sebelum mencapai titik jenuh pengendapan pada kondisi tertentu.

Keseimbangan kimia dalam proses pengendapan menjelaskan bahwa ketika besi ditambahkan dalam jumlah yang melebihi kebutuhan untuk mengendapkan ion tembaga, maka besi terlarut akan berkurang. Dalam konteks ini, nilai standar potensial untuk reaksi reduksi ion tembaga dan oksidasi besi (reaksi 3) adalah 0,777 volt (Hayes and Gray, 1985). Ketika perhitungan energi bebas Gibbs standar untuk reaksi 3 dilakukan, dapat disimpulkan bahwa proses pengendapan tembaga oleh besi akan terjadi secara spontan karena nilai perubahan energi bebas Gibbs untuk reaksi 1 adalah negatif. Dalam ilustrasi pada Gambar 2(b), juga terlihat bahwa jika penambahan besi melebihi 2 kali stoikiometri reaksi, persentase kelarutan besi menurun karena jumlah tembaga yang masih tersisa dalam larutan menjadi sangat minim. Pada saat penambahan besi setara dengan 2 kali stoikiometri reaksi, sekitar 99% tembaga dalam larutan telah bereaksi dan mengendap oleh besi. Oleh karena itu, penambahan besi di atas 2 kali stoikiometri tidak memberikan kontribusi yang signifikan karena jumlah tembaga yang tersisa dalam larutan sangat sedikit. Akibatnya, efisiensi kelarutan besi menurun, dan penambahan besi lebih lanjut tidak berpengaruh signifikan pada proses pengendapan tembaga.



(a)

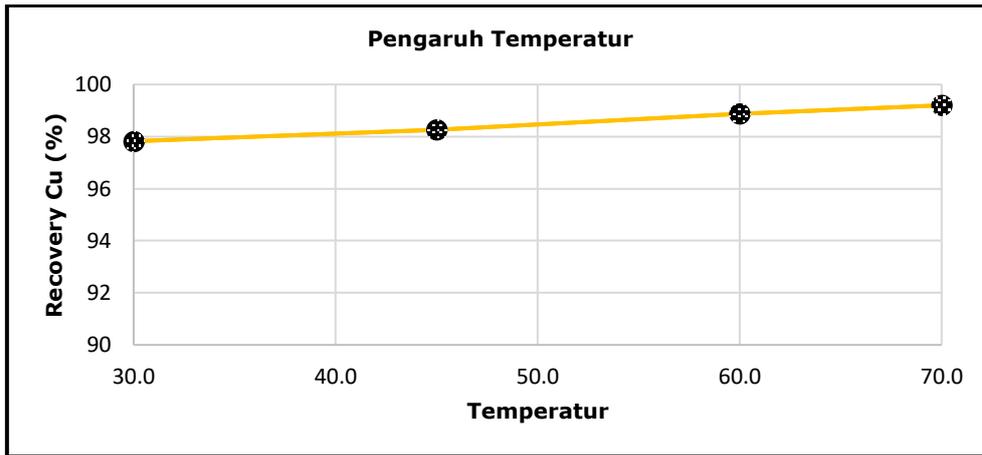


(b)

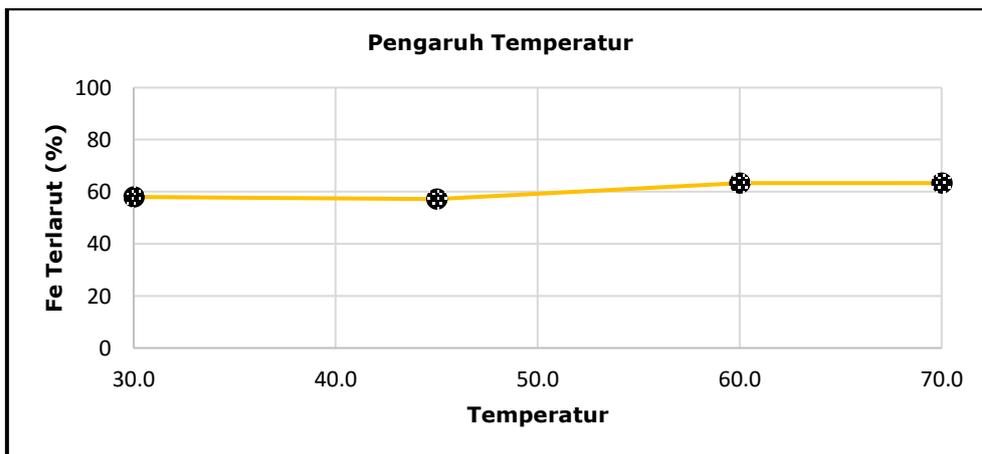
**Gambar 2.** Optimasi penambahan besi terhadap (a) persen recovery tembaga, (b) persen besi terlarut

### 3.3. Optimasi Temperatur

Pengaruh suhu terhadap proses recovery tembaga telah dianalisis pada kecepatan pengadukan sebesar 200 rpm dan penambahan besi sebanyak 2 kali stoikiometri reaksi selama 60 menit. Berbagai suhu pengendapan dieksplorasi mulai dari 30 °C hingga 70 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatkan suhu pengendapan dari 30 °C menjadi 45 °C menghasilkan sedikit peningkatan persentase recovery tembaga yang mengendap dari larutan tembaga sulfat. Namun, ketika suhu dinaikkan lebih tinggi dari 45 °C hingga mencapai 70 °C, jumlah tembaga yang dapat diendapkan cenderung meningkat hingga mencapai 99,20%. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh kenyataan bahwa peningkatan suhu hingga 70 °C menyebabkan endapan tembaga yang lebih padat dan lebih cepat menutupi permukaan logam besi.



(a)



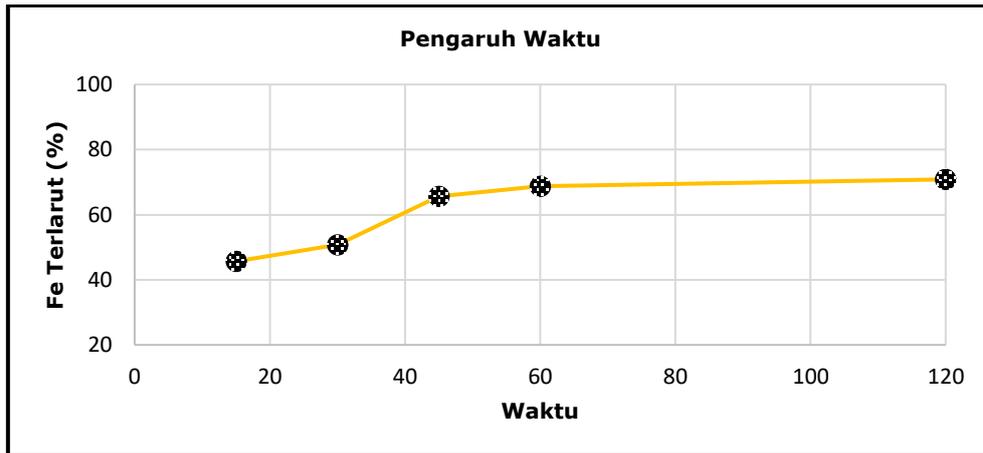
(b)

**Gambar 3.** Optimasi temperatur terhadap (a) persen recovery tembaga, (b) persen besi terlarut

Hubungan antara laju difusi pengendapan tembaga dan temperatur dapat dijelaskan dengan kenaikan suhu yang menyebabkan partikel dalam larutan bergerak lebih cepat dan acak. Ini memungkinkan partikel-partikel tersebut untuk lebih cepat mencapai permukaan reaksi, meningkatkan laju difusi (Subagja, 2018). Selain itu, kenaikan suhu juga dapat mempercepat laju reaksi secara keseluruhan, termasuk reaksi pengendapan tembaga. Namun, efek ini tidak selalu linier dan bergantung pada aspek kinetika dan termodinamika reaksi.

Proses recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat menggunakan besi adalah suatu proses di mana tembaga dalam larutan berinteraksi dengan besi untuk membentuk endapan tembaga di permukaan besi. Dalam proses ini, faktor penting yang mempengaruhi bagaimana reaksi berlangsung adalah seberapa cepat ion-ion tembaga dalam larutan dapat mencapai permukaan besi di mana reaksi tersebut terjadi. Inilah yang dimaksud dengan laju difusi ion tembaga dari fasa larutan ke permukaan besi. Pentingnya laju difusi ini terletak pada seberapa cepat ion tembaga yang ada dalam larutan dapat "mengakses" permukaan besi tempat reaksi dengan besi terjadi. Jika laju difusi ini lambat, maka akan ada keterlambatan dalam berlangsungnya reaksi antara ion tembaga dan besi, yang pada gilirannya dapat menghambat pertumbuhan endapan tembaga di permukaan besi.





(b)

**Gambar 5.** Optimasi temperatur terhadap (a) persen recovery tembaga, (b) persen besi terlarut

Waktu yang melebihi 30 menit memungkinkan terjadinya lebih banyak reaksi, yang menghasilkan pengendapan lebih banyak tembaga. Namun, setelah 30 menit, penambahan durasi reaksi lebih lanjut tidak memiliki dampak yang signifikan pada pengendapan tembaga. Hal ini disebabkan oleh pencapaian keseimbangan reaksi, di mana semua ion tembaga bereaksi dengan besi dan pengendapan mencapai titik jenuh. Selain itu, penutupan permukaan besi dapat mengurangi perbedaan potensial antara ion tembaga dan logam besi dan memperlambat proses pengendapan tembaga. Sementara itu, dalam hal persentase kelarutan besi yang ditunjukkan dalam Gambar 4(b), peningkatan durasi reaksi hingga 60 menit menghasilkan peningkatan persentase kelarutan besi. Meskipun begitu, peningkatan lebih lanjut dalam durasi reaksi tidak mengakibatkan perubahan yang signifikan pada kelarutan besi. Fenomena ini juga dipengaruhi oleh penurunan arus galvanik, yang memperlambat laju reaksi sementasi antara logam besi dan ion tembaga (Subagja, 2018). Arus galvanik pada proses pengendapan tembaga mengacu pada arus listrik yang terjadi dalam sebuah sel elektrokimia selama reaksi redoks ini berlangsung.

#### 4. CONCLUSION

Kondisi optimal untuk proses recovery tembaga dari larutan tembaga sulfat melalui metode sementasi menggunakan besi sekrap adalah sebagai berikut:

1. Persen recovery tembaga mencapai kondisi optimal pengadukan yaitu pada kecepatan 200 rpm, dimana peningkatan kecepatan pengadukan cenderung menghasilkan persen recovery tembaga yang stagnan.
2. Persen recovery tembaga mencapai kondisi optimal penambahan besi sekrap yaitu hingga 2 kali reaksi stoikiometri, namun peningkatan lebih lanjut hingga 3 kali reaksi stoikiometri tidak signifikan.
3. Persen recovery tembaga mencapai kondisi optimal temperatur yaitu hingga 70 °C, dimana menghasilkan persen recovery sebesar 99,20%.
4. Persen recovery tembaga mencapai kondisi optimal pada waktu 120 menit sebesar 99,37%.
5. Hasil ini menunjukkan bahwa metode ini memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dalam pengendapan tembaga dari larutan tembaga sulfat.

#### REFERENCES

- Bai, S. *et al.* (2017) 'Process Improvement and Kinetic Study on Copper Leaching from Low-grade Cuprite Ores', *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54(2), pp. 300–310.
- Bisztyga-Szklarz, M. *et al.* (2021) 'In Situ Regeneration of Copper-Coated Gas Diffusion Electrodes for Electroreduction of  $\text{CO}_2$  to Ethylene', *Materials*, 14(12).
- Dávila-Pulido, G.I. *et al.* (2020) 'Copper Removal from a Cyanidation Liquor by Electrowinning using Batch and Continuous Flow Cells.', *Canadian Metallurgical Quarterly*, 59(1), pp. 17–25.

- Harichandan, B. and Mandre, N.R. (2021) 'Studies on the Potential Recovery of Copper from Low-grade Mixed Sulfide-oxide Ore and Optimization of the Process Parameters', *Separation Science and Technology*, 57(5), pp. 719–732.
- Hayes, P.C. and Gray, P.M.J. (1985) *Process Selection in Extractive Metallurgy*. Australia: Hayes Pub. Co.
- Jena, S.S. *et al.* (2022) 'Sustainable Use of Copper Resources: Beneficiation of Low-grade Copper Ores', *Minerals*, 12(5).
- Kamberović, Ž. *et al.* (2018) 'Hydrometallurgical Process for Selective Metals Recovery from Waste-Printed Circuit Boards', *Metals*, 8(6).
- Kim, G.-H., Hong, H.-S. and Jung, H.-C. (2012) 'Recovery of Copper Powder from MoO<sub>3</sub> Leaching Solution Using Cementation Reaction System', *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, 19(6), pp. 405–411.
- Luo, W.B., Wang, J.K. and Yin, G. (2018) 'Study on Copper Kinetics in Processing Sulphide ore Mixed with Copper and Zinc with Sulfuric Acid Leaching under Pressure', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 303(1).
- Nurtazina, N.D., Azhigulova, R.N. and Uvarov, N.F. (2022) 'Glycine Leaching Kinetics of Chalcocite in Alkaline Medium in the Presence of Hydrogen Peroxide', *Chemical Journal of Kazakhstan*, 78(2), pp. 16–25.
- Shin, D.J. *et al.* (2021) 'Study for Separation Process of Copper from the Low-grade Copper Ore by Hydrometallurgical Process', *Resources Recycling*, 30(5), pp. 57–66.
- Shishkin, A. *et al.* (2018) 'Cavitation-Dispersion Method for Copper Cementation from Wastewater by Iron Powder', *Metals*, 8(11).
- Subagja, R. (2018) 'Pengendapan Tembaga dari Larutan Tembaga sulfat dengan Cara Sementasi menggunakan Besi', *Metalurgi*, 29(2), pp. 161–170.
- Subagja, R., Setiawan, I. and Rhamdani, A.R. (2021) 'Copper Dissolution into the Aqueous Sulfuric Acid Solutions from Printed Circuit Board Waste Sludge', *Proceedings of the 4th International Seminar on Metallurgy and Materials (ISMM2020): Accelerating Research and Innovation on Metallurgy and Materials for Inclusive and Sustainable Industry*, 2382.
- Wang, H. *et al.* (2022) 'An Experimental Comparison: Horizontal Evaluation of Valuable Metal Extraction and Arsenic Emission Characteristics of Tailings from Different Copper Smelting Slag Recovery Processes', *Journal of hazardous materials*, 430.
- Wang, L., Cheng, W.C. and Xue, Z.F. (2022) 'The Effect of Calcium Source on Pb and Cu Remediation Using Enzyme-Induced Carbonate Precipitation', *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.