

Optimasi Fe-S Pada Residu *Leaching* Emas dengan Flotasi Powder Lime dan Lime Milk

Zahna Allya Zulfa Suratinoyo¹, Yasmina Amalia^{1*}, & Dyah Probowati¹

¹. Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN "Veteran" Yogyakarta

*Email: yasminaamalia@upnyk.ac.id

ABSTRACT

Gold processing using the leaching method can produce large amounts of residue that often contain iron (Fe) and sulphur (S). This residue has the potential to become hazardous waste if not managed properly, as the sulphide content can cause acid mine drainage and environmental contamination. The Fe-S content has potential as an additive in the construction industry, such as in asphalt and concrete mixtures. One method that can be used to separate and reuse the Fe-S components from leaching residues is flotation. This study was conducted quantitatively through laboratory experiments. The reagents used in this study were PAX (Potassium Amyl Xanthate) as a collector, MIBC (Methyl Isobutyl Carbinol) as a frother, and CuSO₄ and lime as modifiers. The lime used was powder lime (lime powder) and lime milk (dissolved lime). The objective of this study was to determine the influence of powder lime and lime milk variables in the flotation process of gold leaching residues, as well as to determine the optimal use of lime in terms of economic efficiency. The results obtained from this study indicate that flotation using powdered lime is more economical, with a lime cost of Rp165.60 per kg of feed, yielding an Fe content of 38.9% and an S content of 49.1%. Furthermore, the Fe recovery rate was 77.5% and the S recovery rate was 80.1%.

Keywords: Flotation, Gold Leaching Residue, Powder Lime, Lime Milk

PENDAHULUAN

Residu Fe dan S pada hasil pengolahan *leaching* emas berpotensi menjadi limbah berbahaya apabila tidak dikelola dengan baik, mengingat kandungan sulfida dapat menyebabkan pembentukan asam tambang (*acid mine drainage*) dan kontaminasi lingkungan[2][5][12]. Kandungan mineral logam seperti Fe-S yang terdapat dalam residu tersebut memiliki potensi sebagai bahan imbuh pada industri konstruksi, seperti pada campuran aspal dan beton[7]. Unsur Fe dan S tersebut dapat dipisahkan dengan menggunakan flotasi. Flotasi merupakan teknik pemisahan berbasis perbedaan sifat permukaan partikel, yang dapat ditingkatkan dengan penggunaan reagen tertentu[6]. Dalam hal ini, penggunaan kapur dalam bentuk *powder lime* (kapur bubuk) dan *lime milk* (kapur yang dilarutkan) sebagai reagen flotasi dapat memberikan pengaruh berbeda terhadap efisiensi pemisahan Fe-S, khususnya dalam kondisi pH asam yang khas pada residu *leaching* emas. Flotasi yang dilakukan akan memanfaatkan perbedaan sifat hidrofobisitas partikel dalam suspensi air dengan bantuan reagen kimia tertentu, seperti kolektor, *frother*, dan *modifier*. Adapun reagen yang digunakan sebagai kolektor adalah PAX (*Potassium Amyl Xanthate*). Lalu, untuk reagen *frother* yang digunakan adalah MIBC (*Methyl Isobutyl Carbinol*). Kemudian, untuk *modifier* yang digunakan adalah CuSO₄ dan kapur[10][11]. Kapur memiliki peran penting dalam mengatur pH *pulp*, meningkatkan efisiensi pemisahan mineral, serta mengurangi dampak negatif dari senyawa pengganggu yang dapat menurunkan kualitas konsentrat. Dengan penggunaan kapur, flotasi dapat lebih selektif, sehingga meningkatkan perolehan dan kemurnian mineral berharga[3].

Preparasi dibutuhkan sebelum melakukan flotasi. Preparasi adalah operasi pengecilan ukuran bijih dengan peremuk dan penggerusan. Tujuannya adalah untuk menghasilkan partikel yang sesuai dengan kebutuhan, membebaskan mineral berharga dari pengotor, serta memperbesar luas permukaan sehingga kecepatan reaksi pelarutan dapat berlangsung dengan lebih baik[1]. Flotasi umum digunakan untuk memisahkan bijih sulfida, karbonat, dan oksida, serta melibatkan interaksi antara tiga fase padat, cair, dan gas. Partikel yang lebih kecil dan kasar cenderung terangkat oleh gelembung gas, sedangkan partikel yang lebih besar atau halus cenderung tetap di dalam larutan. Dalam proses flotasi, penambahan reagen seperti kolektor dan *frother* sangat penting untuk mengubah sifat permukaan mineral dari hidrofilik menjadi hidrofobik, sehingga meningkatkan efektivitas pemisahan. Kolektor secara selektif melapisi mineral berharga, menjadikannya hidrofobik

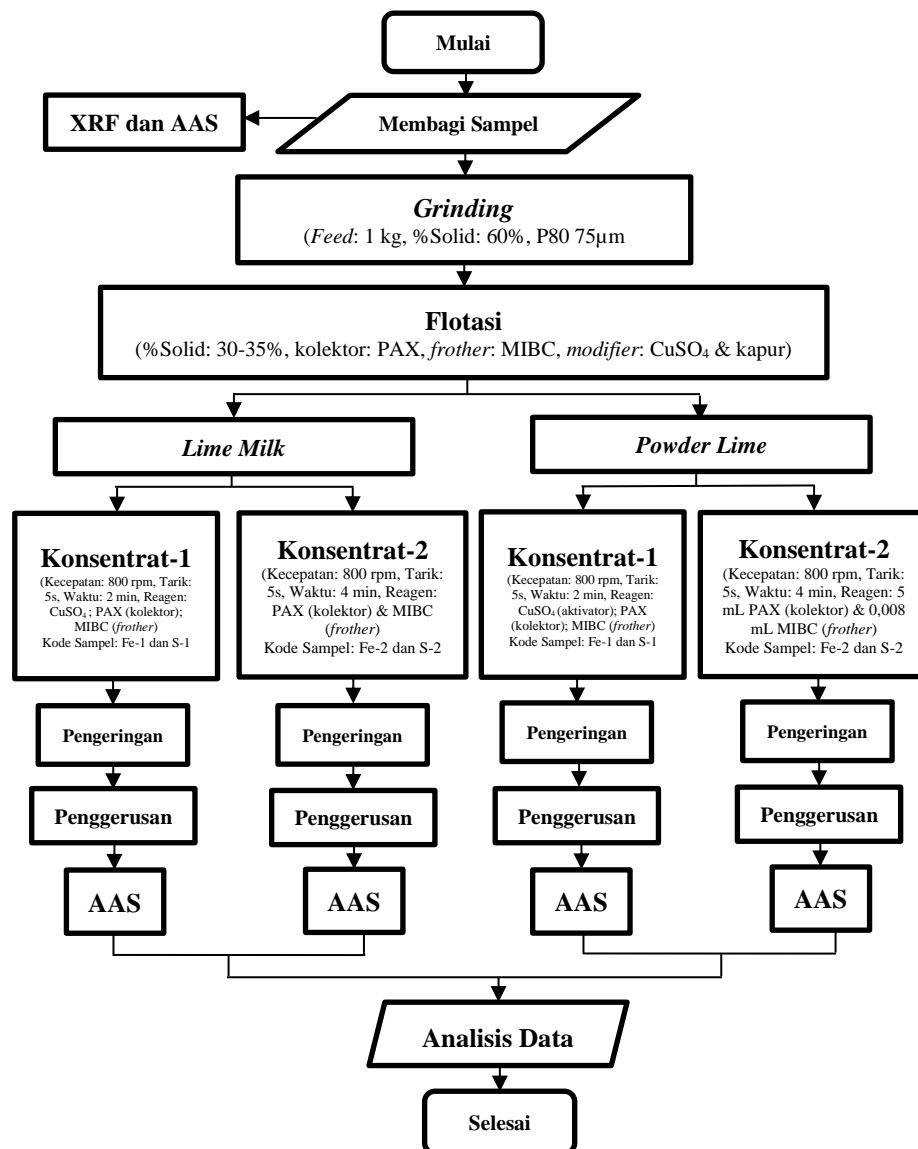
dan memungkinkan partikel tersebut menempel pada gelembung udara, sedangkan *frother* membantu pembentukan gelembung yang stabil[14]. Dalam proses flotasi bijih tembaga, *xanthate* merupakan kolektor utama yang paling sering digunakan[4]. Dalam proses flotasi bijih tembaga-nikel sulfida, keberadaan mineral serpentin secara signifikan dapat menurunkan kinerja flotasi tembaga-nikel sulfida[16].

Kolektor berfungsi untuk membentuk lapisan film pada permukaan partikel mineral berharga. Kolektor terdiri dari dua bagian yaitu *reactive head group* yang bersifat polar dan berikatan dengan permukaan mineral, sedangkan ujung yang lain yaitu rantai hidrokarbon bersifat non-polar dan menghadap keluar membentuk permukaan baru yang dapat berikatan dengan gelembung udara. Kemudian, *frother* termasuk senyawa heteropolar yang terdiri dari gugus alkohol dan rantai hidrokarbon dan memiliki sifat aktivitas permukaan yang menyebabkan reagen ini dapat terserap dalam interfasa udara-air dan mereduksi tegangan permukaan. *Frother* yang baik dapat mengumpulkan kekuatan, dan menghasilkan buih yang cukup stabil untuk memfasilitasi perpindahan flotasi mineral dari permukaan sel ke *collecting launder*. Selanjutnya, *modifier* diklasifikasikan dalam aktivator dan *depressant*. Aktivator berfungsi untuk meningkatkan kemampuan kimiawi alami permukaan mineral sehingga mineral tersebut dapat bersifat hidrofobik. *Depressant* berfungsi untuk meningkatkan selektifitas flotasi dengan menahan mineral hidrofilik untuk tidak ikut terapung[10].

Peralatan yang digunakan dalam proses flotasi diharuskan untuk memberikan media udara bagi partikel hidrofobik agar bisa menempel dan terangkut ke permukaan. Media udara ini diberikan dalam bentuk gelembung udara yang dimasukkan dalam *tank slurry* dengan cara agitasi[8]. *Mechanical flotation cell* merupakan teknik flotasi yang paling banyak digunakan[13]. Tujuan utama dari tiap desain yang ada adalah untuk memaksimalkan probabilitas tubrukan antara gelembung udara dan partikel hidrofobik. Lebih dari itu, setiap sel flotasi didesain untuk menunjang performa lain, yaitu menciptakan kondisi turbulen yang cukup untuk mensukseskan penempelan partikel ke gelembung udara, mensirkulasikan solid yang ada dalam kondisi suspensi, mendispersikan udara dengan efisien, memperlancar transfer partikel dari *pulp* ke *froth zone*, dan memaksimalkan *recovery*[9].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian dilakukan secara kuantitatif dengan melakukan percobaan laboratorium. Adapun diagram alir metode percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Percobaan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan percobaan dan pengujian yang dilakukan, didapatkan hasil-hasil yang akan dijelaskan di bawah ini. Pada Tabel 1 disajikan data hasil pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) sampel residu leaching emas yang dapat dilihat di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*)

No	Identifikasi Fasa Mineral	Rumus Kimia Mineral	Persentase Mineral (%)
1.	<i>Anhydrite</i>	CaSO ₄	1.6
2.	<i>Barite</i>	BaSO ₄	19.4
3.	<i>Gypsum</i>	CaSO ₄ .2H ₂ O	1.6
4.	<i>Melanterite-Cu</i>	Cu.Fe.9(SO ₄) (H ₂ O) ₇	8.9
5.	<i>Pyrite</i>	FeS ₂	65.1
6.	<i>Quartz</i>	SiO ₂	1.9

No	Identifikasi Fasa Mineral	Rumus Kimia Mineral	Persentase Mineral (%)
7.	<i>Sulfur</i>	S	1.5
Total			100.0

Berdasarkan Tabel 1 di atas, mineral yang paling banyak terdapat pada sampel residu *leaching* emas adalah pirit dengan persentase 65,1%. Mineral pirit merupakan mineral utama sebagai penyumbang besi (Fe) dan sulfur (S). Pirit sering kali dikaitkan dengan bijih tembaga dan emas dalam flotasi, dan keberadaannya dalam jumlah besar bisa mempengaruhi pemisahan mineral berharga. Kemudian, setelah flotasi, dilakukan pengujian kadar pada masing-masing konsentrat menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) yang dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kadar Konsentrat

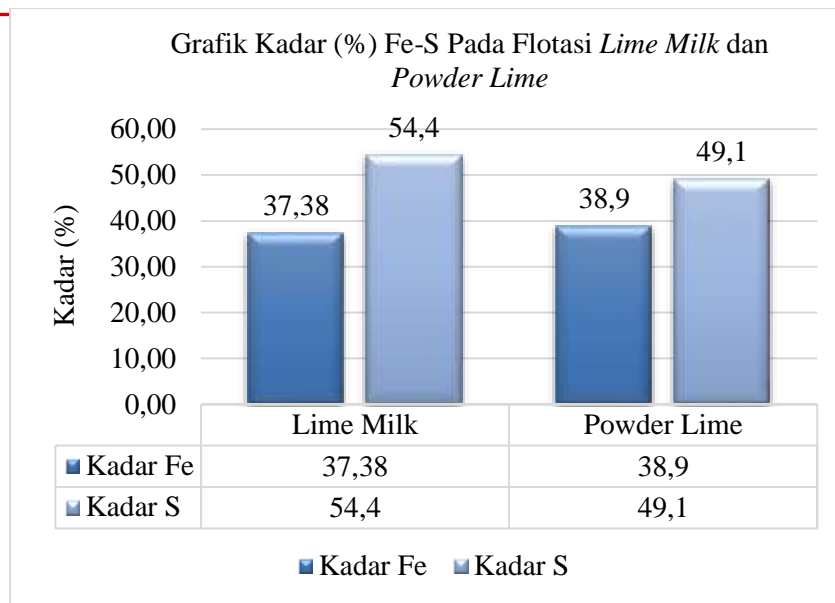
Metode Flotasi	Kadar Konsentrat (%)					
	Fe - 1	Fe - 2	Rata - Rata	S - 1	S - 2	Rata - Rata
<i>Lime Milk</i>	37,60	37,16	37,38	54,70	54,10	54,40
<i>Powder Lime</i>	39,10	38,70	38,90	50,10	48,10	49,10

Berdasarkan Tabel 2 di atas, flotasi dengan *lime milk* didapatkan kadar Fe dan S lebih tinggi di konsentrat pertama, yaitu untuk Fe sebesar 37,60% dan sulfur sebesar 54,70%. Sedangkan, untuk hasil kadar pada konsentrat kedua menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda, yaitu untuk kadar Fe sebesar 37,16% dan kadar S sebesar 54,10%. Lalu, pada flotasi dengan menggunakan *powder lime* didapatkan kadar Fe pada konsentrat pertama sebesar 39,10% dan di konsentrat kedua sebesar 38,70%. Selanjutnya, kadar S pada konsentrat pertama sebesar 50,10% dan kadar pada konsentrat kedua sebesar 48,10%. Berdasarkan data tersebut, didapatkan kadar rata-rata flotasi *lime milk* untuk unsur Fe sebesar 37,38% dan S sebesar 54,40%. Lalu, untuk flotasi *powder milk* didapatkan kadar Fe rata-rata sebesar 38,90% dan kadar S rata-rata sebesar 49,10%. Setelah dilakukan pengujian terhadap konsentrat maka dapat ditemukan nilai dari *recovery* pada setiap unsur Fe dan S. Berikut pada Tabel 5.4 disajikan hasil *recovery* dari tiap unsur Fe dan S. Kemudian, nilai *recovery* yang didapatkan pada masing-masing variabel flotasi dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini.

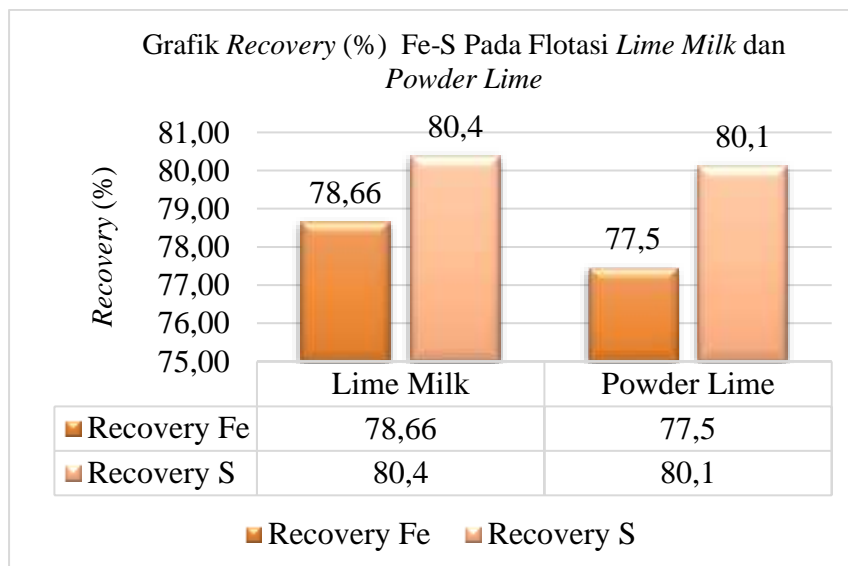
Tabel 3. Hasil *Recovery* Konsentrat pada Flotasi *Lime Milk* dan *Powder Lime*

Metode Flotasi	<i>Recovery</i> (%)					
	Fe - 1	Fe - 2	Kumulatif	S - 1	S - 2	Kumulatif
<i>Lime Milk</i>	43,10	35,50	78,70	44,10	36,30	80,40
<i>Powder Lime</i>	43,00	34,40	77,50	45,10	35,0	80,10

Berdasarkan Tabel 3 di atas, diperoleh hasil *recovery* unsur Fe dan S yang disajikan dalam bentuk persentase. Pada flotasi menggunakan *lime milk* didapatkan persentase *recovery* Fe pada konsentrat pertama sebesar 43,10% dan pada konsentrat kedua sebesar 35,50%. Lalu, untuk *recovery* S pada konsentrat pertama diperoleh hasil sebesar 44,10% dan pada konsentrat kedua sebesar 36,30%. Kemudian, pada flotasi menggunakan *powder lime* diperoleh persentase *recovery* Fe di konsentrat pertama sebesar 43,00% dan di konsentrat kedua sebesar 34,40%. Selanjutnya, untuk *recovery* S di konsentrat pertama didapatkan hasil sebesar 45,10% dan di konsentrat kedua sebesar 35,00%. Sehingga didapatkan *recovery* kumulatif flotasi *lime milk* sebesar 78,70% untuk unsur Fe dan 80,40% untuk unsur S. Lalu, pada flotasi *powder lime* didapatkan *recovery* kumulatif untuk unsur Fe sebesar 77,50% dan 80,10% untuk unsur S. Dari hasil tersebut, persentase *recovery* Fe maupun S yang lebih tinggi didapatkan dengan menggunakan flotasi *lime milk* karena penggunaan kapur yang jauh lebih tinggi pada flotasi *lime milk*.

Gambar 2. Grafik Kadar Fe-S Pada Flotasi *Lime Milk* dan *Powder Lime*

Berdasarkan Gambar 2 di atas, didapatkan hasil secara keseluruhan bahwa kadar yang diperoleh lebih tinggi didapatkan pada flotasi menggunakan *lime milk* walaupun tidak memberikan selisih yang besar. Kadar Fe dan S pada tiap konsentrat lebih tinggi pada flotasi menggunakan *lime milk* daripada dengan *powder lime*. Kadar rata-rata flotasi *lime milk* untuk unsur Fe sebesar 37,38% dan unsur S sebesar 54,40%. Kemudian, kadar rata-rata flotasi *powder lime* untuk unsur Fe sebesar 38,90% dan unsur S sebesar 49,10%. Hasil kadar yang lebih tinggi pada flotasi *lime milk* tersebut disebabkan oleh penggunaan dosis kapur. Konsumsi kapur kering pada flotasi *lime milk* jauh lebih tinggi daripada *powder lime*, yaitu sebesar 2,334 gr dan pada flotasi *powder lime* sebesar 0,46 gr. Perbedaan penggunaan kapur tersebut hampir berbeda lima kali lipat. Sehingga dapat dianalisis bahwa penggunaan dosis kapur dapat mempengaruhi besaran kadar yang diperoleh pada tiap konsentrat. Berikutnya adalah grafik tentang *recovery* Fe-S di setiap konsentrat flotasi *lime milk* dan *powder lime* yang dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini.

Gambar 3. Grafik *Recovery* Fe-S (%) Pada Flotasi *Lime Milk* dan *Powder Lime*

Pada Gambar 3 di atas, *recovery* Fe dan S dihasilkan lebih tinggi dengan flotasi menggunakan *lime milk* daripada dengan menggunakan *powder lime*. Hasil *recovery* kumulatif pada flotasi *lime milk* untuk unsur Fe sebesar 78,66% dan unsur S sebesar 80,40%. Lalu, *recovery* kumulatif pada flotasi

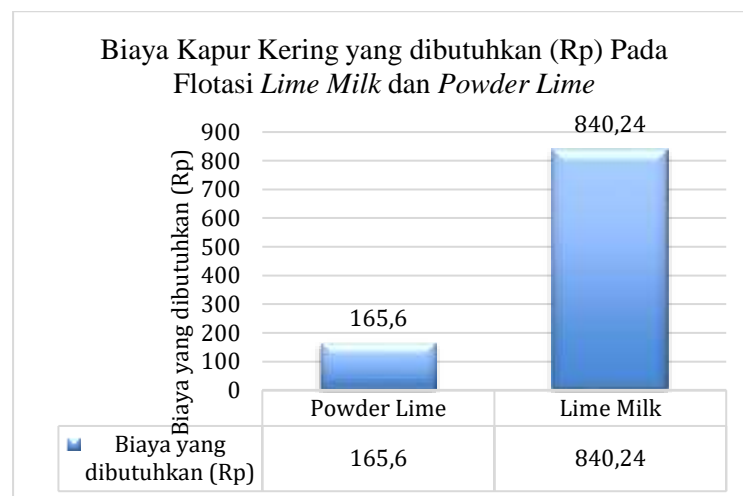
◆ *powder lime* untuk unsur Fe sebesar 77,50% dan unsur S sebesar 80,10%. Hasil *recovery* dari kedua variabel flotasi tersebut tidak terlalu menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan.

Berdasarkan data di atas, dapat dianalisis bahwa dosis penggunaan kapur berpengaruh terhadap nilai *recovery* kumulatif yang dihasilkan. Sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Zanin dkk pada tahun 2019, diperoleh bahwa penggunaan dosis kapur mempengaruhi perolehan *recovery* yang dihasilkan[15]. Kemudian, *recovery* sulfur dalam residu *leaching* berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Lin pada tahun 2003, dapat dilakukan menggunakan flotasi satu tahap saja karena sulfur pada residu *leaching* biasanya dapat mencapai lebih dari 50% total berat residu[8]. Sehingga pemanfaatan sulfur dapat dilakukan dengan lebih ekonomis guna memenuhi kebutuhan tertentu.

Tabel 3. Konsumsi Kapur Flotasi *Powder Lime* dan *Lime Milk*

Variabel Flotasi	Konsumsi Kapur (gr)
<i>Powder Lime</i>	0,46 (kering)
<i>Lime Milk</i>	11,69 (<i>slurry</i>) atau 2,334 (kering)

Berdasarkan Tabel 3 di atas, dapat dilihat bahwa jumlah konsumsi kapur kering lebih banyak pada flotasi menggunakan *lime milk*, yaitu sebanyak 2,334 gr. Sedangkan, pada flotasi menggunakan *powder lime* lebih sedikit jumlahnya, yaitu sebanyak 0,46 gr. Penggunaan kapur tersebut berhenti saat pH telah mencapai pH target, yaitu dari rentang 5.5 hingga 6.5. Melalui hasil di atas maka saat melakukan flotasi dengan menggunakan *powder lime* lebih cepat untuk mencapai target pH yang diinginkan daripada dengan menggunakan *lime milk*. Lalu, untuk perhitungan kapur kering yang dikonsumsi pada flotasi *lime milk* adalah dengan menghitung 20% dari jumlah *slurry lime milk* karena perbandingan untuk membuat *lime milk* adalah 1:4, yaitu perbandingan kapur kering dan aquades yang ditambahkan. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Zanin dkk, 2019 kebutuhan dosis kapur dalam operasi flotasi (biasanya berkisar antara 0,4–2,5 kg per ton metrik bijih masukan). Artinya, dibutuhkan dosis kapur berkisar 0,4 – 2,5 gr per kilogram bijih yang dimasukkan dengan jenis kapur yang digunakan adalah $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Hal ini membuktikan bahwa penelitian yang dilakukan memiliki hasil konsumsi kapur yang sama berada dengan penelitian sebelumnya, yaitu untuk flotasi *powder lime* sebesar 0,46 gr dan flotasi *lime milk* sebesar 2,334 gr. Penggunaan dosis kapur tersebut mengacu pada flotasi dengan tipe bijih yang dimasukkan adalah sulfida. Penggunaan dosis kapur pada tiap metode flotasi dihitung berdasarkan berat dari kapur kering. Berdasarkan hasil percobaan sebelumnya, penggunaan kapur lebih banyak pada variabel *lime milk* dengan konsumsi sebesar 2,334 gram. Sedangkan, pada variabel *powder lime* sebanyak 0,46 gram. Jenis kapur yang digunakan adalah kapur untuk *raw material* dengan komposisi utama $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan kemurnian 96,5%. Adapun harga pasaran untuk kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ di Indonesia adalah sekitar Rp36.000,- per 100 gram. Sehingga penggunaan kapur berdasarkan harga rata-rata dapat dilihat pada Gambar 6.3 berikut.

Gambar 4. Biaya Penggunaan Kapur pada Flotasi *Powder Lime* dan *Lime Milk*

Berdasarkan Gambar 4 di atas, biaya penggunaan kapur lebih tinggi pada flotasi menggunakan *lime*

lime milk, yaitu sebesar Rp840,26,-. Biaya tersebut lebih tinggi karena linear dengan penggunaan kapur kering yang dibutuhkan pada saat flotasi *lime milk*, yaitu sebesar 2,334 gr. Sedangkan, biaya yang dibutuhkan pada flotasi *powder lime* sebesar Rp165,60,- karena kapur yang dibutuhkan juga lebih sedikit pada flotasi dengan *powder lime*. Pada flotasi dengan menggunakan *lime milk* didapatkan hasil yang lebih tinggi terhadap kadar dan *recovery* nya walaupun jumlah kapur dan biaya yang dibutuhkan jauh lebih tinggi daripada flotasi dengan menggunakan *powder lime*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zanin dkk, 2019 konsumsi penggunaan kapur adalah pada rentang 0,4 – 2,5 gr per 1 kilogram bijih yang dimasukkan dan penggunaan kapur juga berpengaruh terhadap nilai kadar dan *recovery* yang dihasilkan. Sehingga penggunaan kapur pada penelitian kali ini memiliki rentang penggunaan yang sama terhadap penelitian sebelumnya oleh Zanin dkk, 2019.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah flotasi *lime milk* menunjukkan *recovery* Fe dan S yang lebih baik jika dibandingkan dengan flotasi *powder lime* dengan hasil yang tidak jauh berbeda. Kemudian, penggunaan kapur lebih optimal pada flotasi *powder lime* karena hanya mengkonsumsi kapur kering sebanyak 0,46 gr dengan biaya kapur sebesar Rp165,60,- per satu kg umpan (berbeda 1:5 dengan *lime milk*), serta memiliki *recovery* Fe-S yang tidak jauh berbeda dengan flotasi *lime milk*.

SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk percobaan selanjutnya adalah dengan melakukan penambahan variasi jenis kapur yang digunakan untuk melihat pada jenis kapur manakah paling efektif untuk flotasi Fe dan S. Kemudian, melakukan penambahan percobaan pada setiap variabel flotasi untuk memastikan flotasi yang dilakukan tetap konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aminah, S., Suparno, F. A. D., & Haeruddin, H, "Preparasi dan Analisis Kandungan Unsur dalam Batuan Bijih Emas", 2022.
- [2] Arifin, U. R., Jadid, M. M., & Widiono, B, "Pengolahan Limbah Air Asam Tambang Emas dengan Proses Netralisasi Koagulasi Flokulasi". DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi, 5(2), 112-120, 2019.
- [3] Arsy, L., Muhammad, Y., Widodo, S., & Bakri, H, "Analisis nilai *recovery* au dan cu terhadap konsumsi lime dengan variasi titik penambahan pada proses flotasi". Jurnal Geomine, 6(1), 274087, 2018.
- [4] Bulatovic, S. M, Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: Volume 1: flotation of sulfide ores. Elsevier. 2007.
- [5] Jafar, N, "Analisis Karakteristik Limbah Pengolahan Emas dan Potensi Pemicu Air Asam Tambang pada Pertambangan Rakyat Kelurahan Poboya Kab. Donggala, Prov. Sulawesi Tengah", Jurnal Geomine, 6(2), 49-53, 2018.
- [6] Jaya, D., & Soegondo, E, "Pemanfaatan CPO (Crude Palm Oil) Untuk Desulfurisasi Pada Batubara Menggunakan Metode Flotasi Eksergi", 13(2), 27-32, 2016.
- [7] Khedaywi, T., Haddad, M., & Hwarie, S. (2025). "Effect of waste iron powder on properties of asphalt concrete mixtures: state of the art". International Journal of Pavement Research and Technology, 18(1), 91-101, 2025.
- [8] Li and H. Zhang, "A review of bulk nanobubbles and their roles in flotation of fine particles," Powder Technol., vol. 395, pp. 618–633, 2022.
- [8] Lin, H. K, "Characterization and flotation of sulfur from chalcopyrite concentrate leaching residue. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering", 2(1), 1-9, 2003.
- [9] Mesa and P. R. Brito-Parada, "Bubble size distribution in aerated stirred tanks: Quantifying the effect of impeller-stator design," Chem. Eng. Res. Des. Vol.160, no. 1, pp. 356–369, 2020.
- [10] Oktikawati, A., Nugraha, C. A., & Soedarsono, J. W, "Studi Pengaruh Titik Penambahan Sodium Isobutyl Xanthate (SIBX) dan Kecepatan Impeller pada Performa Flotasi Mineral Tembaga". Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi, 6(1), 18-29, 2023.

- [11] Sukamto, K., Lukum, A., & La Kilo, A., "STUDI PENGARUH VARIASI PH DAN KOLEKTOR PADA EFISIENSI FLOTASI MINERAL TEMBAGA SULFIDA". *Jurnal Crystal: Publikasi Penelitian Kimia dan Terapannya*, 7(1), 108-119, 2025.
- [12] Wahyudin, I., Widodo, S., & Nurwaskito, A., "Analisis penanganan air asam tambang batubara". *Jurnal Geomine*, 6(2), 85-89, 2018.
- [13] Wang and Q. Liu, "Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review," *Miner. Eng.*, vol. 173, no. May, p. 107220, 2021.
- [14] Will. B. A., & Munn, T. N., "An Introduction to The Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery 7th edition: Mineral Processing Technology". Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- [15] Zanin, M., Lambert, H., & Du Plessis, C. A., "Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review". *Minerals Engineering*, 143, 105922, 2019.
- [16] Zhao, K., Yan. W., Wang, X., Gao, Z., & Wang, C., "Effect of a novel phosphate on the flotation of serpetinite-containing copper nickel sulfide ore". *Mineral Engineering*, 2020.