

Studi Pengaruh Titik Penambahan Sodium Isobutyl Xanthate (SIBX) dan Kecepatan Impeller pada Performa Flotasi Mineral Tembaga

Anjar Oktikawati^{1*}, Cahyo Ady Nugraha², Johny Wahyuadi Soedarsono³

^{1,2,3}Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,
Kampus Baru UI Depok, Depok, 16436, Indonesia

*Email: anjar.oktikawati@ui.ac.id

ABSTRACT

Evaluation of the use of the SIBX addition point and energy consumption in a flotation machine is an optimization effort to increase recovery in a valuable mineral separation process. The purpose of this study was to maximize the use of reagents and energy consumption in flotation machines by looking for the effect of the SIBX addition point and impeller speed variations on copper recovery. In the experiments, the authors vary the impeller speed and the SIBX addition points. The impeller speed is varied into five different speeds. While the SIBX addition point into four different points. From the variation of the experiment, the test must be done within 20 flotation kinetics. Those tests were performed for 8 minutes and will generate 4 concentrates and tailings. From this information, a graph of the relationship between recovery and time is obtained, and it can be seen that the point of adding SIBX and impeller speed is to produce optimal recovery values. From the available tailings and feed, an analysis of particle size and distribution is also carried out to check the effectiveness of changing the impeller speed pattern to provide kinetic energy for particles of various sizes to collide with air bubbles and increase the probability of collection of valuable minerals, so that high recovery is obtained in various areas. particle size. Of all the speed variations used in the impeller, the best kinetic recovery comes from the addition of SBX in the 0 min, 2 min, and 4 min. While the worst comes from the addition in the 6 min. Copper kinetic recovery is only affected by the nature and amount of hydrophobic particles but is not affected by impeller speed. Copper recovery at each end of the experiment showed the same value which is an average of about 94%.

Keywords: SIBX; froth stability; impeller speed; kinetics of flotation.

PENDAHULUAN

Flotasi adalah suatu proses untuk memisahkan mineral berharga dan tidak berharga sebagai tahap lanjutan setelah dilakukan kominusi [1]. Produk yang dihasilkan dari suatu proses pengolahan bijih ada dua, yaitu konsentrat dan tailing. Fokus dalam penelitian ini adalah pada sirkuit *rougher flotation* di *concentrator 3* (C3) dan *concentrator 4* (C4) yang merupakan konsentrator penghasil lebih dari 63% jumlah keseluruhan produksi konsentrat di PT. Freeport Indonesia [2] Parameter proses dalam sirkuit flotasi terus dimodifikasi agar bisa diketahui titik optimal operasi. Evaluasi penggunaan reagen dan konsumsi energi dalam mesin flotasi merupakan salah satu upaya optimalisasi untuk meningkatkan *recovery* dalam suatu proses separasi.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh pengaturan proses yang membutuhkan referensi terlebih dahulu dalam skala lab sebelum digunakan di pabrik untuk membuat proses flotasi pada keadaan yang stabil dan menghasilkan *recovery* tembaga yang optimal di C3 dan C4. Penelitian ini juga diharapkan mampu untuk dapat memaksimalkan kegunaan reagen dan konsumsi energi dalam mesin flotasi dengan cara mencari pengaruh titik penambahan SIBX dan kecepatan impeller terhadap *recovery* tembaga dan emas.

Prinsip Flotasi

Flotasi merupakan proses separasi mineral berdasarkan perbedaan kemampuan adhesi terhadap gelembung udara. Proses ini kompleks karena menyertakan interaksi antara partikel mineral, gelembung udara, reagen, air dan mesin flotasi agar terjadi proses pengapungan partikel mineral [3]. Dalam proses flotasi, gelembung udara dilewatkan dalam *slurry* sebagai media yang akan

mengangkut mineral berharga ke permukaan meninggalkan pengotor tenggelam sebagai *tailing*. Hal ini dapat terjadi jika mineral berharga tersebut bersifat hidrofobik atau menolak air. Berbagai reagen kimia ditambahkan untuk membantu proses pemisahan dan pengumpulan mineral berharga sebagai konsentrat. Reagen tersebut adalah sebagai berikut [4][5][6]:

- Kolektor
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.
- *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. *Frothers* yang baik dapat mengumpulkan kekuatan, dan menghasilkan buih yang cukup stabil untuk memfasilitasi perpindahan flotasi mineral dari permukaan sel ke *collecting launder*.
- *Modifier*
Modifier diklasifikasikan dalam *activator* 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. Selektivitas dalam kompleks separasi sangat bergantung pada keseimbangan antara konsentrasi reagen dan pH. Flotasi mungkin dapat dilakukan dalam medium alkali.

Peralatan Flotasi

Peralatan yang akan 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 [7]. *Mechanical flotation cell* merupakan teknik flotasi yang paling banyak digunakan [8]. 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]. Fungsi-fungsi tersebut dibantu oleh adanya energi yang tercipta akibat agitasi mekanik oleh *impeller*.

Kinetika Flotasi

Hal penting yang seharusnya dilakukan pada flotasi adalah dengan meningkatkan interaksi gelembung udara-partikel yang nantinya akan disertai pula dengan meningkat pula *recovery* mineral berharga [10]. Penempelan (*attachment*) yang stabil antara gelembung udara dan partikel dapat terbentuk ketika ada energi kinetik yang cukup dari partikel untuk bisa menubruk gelembung udara. Tetapi jika energi kinetik melebihi energi potensialnya, maka akan terjadi pelepasan kembali (*detachment*) oleh partikel dari gelembung udara [11]. Tubrukan gelembung udara dengan partikel dan energi kinetik partikel adalah sesuatu yang acak. Semakin tinggi probabilitas untuk terjadi tubrukan gelembung udara-partikel, semakin cepat proses flotasi yang dilakukan. Tubrukan dan penempelan gelembung udara dengan partikel dipengaruhi oleh variabel sebagai berikut [12]: Sifat hidrofobik dari partikel yang dipengaruhi oleh komposisi partikel dan penambahan kolektor; jumlah partikel hidrofobik; jumlah dan ukuran gelembung udara, yang dipengaruhi kecepatan aliran udara, penambahan *frother* dan tipe peralatan penghasil gelembung udara; serta distribusi ukuran partikel.

Faktor yang Mempengaruhi Kinetika Flotasi

Kecepatan *Impeller*;

Jika diasumsikan bahwa tubrukan dari partikel yang bebas bergerak dengan gelembung adalah mekanisme yang dominan, maka untuk laju aliran udara tertentu ke sel, meningkatnya kecepatan *impeller* menyebabkan terciptanya gelembung lebih banyak dalam diameter yang lebih kecil yang berpengaruh pada bertambah luasnya permukaan gelembung [13]. Diharapkan gelembung ini bisa dimanfaatkan untuk membawa lebih banyak mineral berharga terapung ke permukaan dan meningkatkan *recovery*. Kecepatan *impeller* mempunyai beberapa pengaruh signifikan seperti sebagai berikut [14]: Aliran turbulen dalam sel, yang menghasilkan perubahan intensitas dan frekuensi tubrukan antara gelembung udara dan partikel; kecepatan waktu kontak partikel dan probabilitas penempelan, yang menjadikan adanya dampak yang lebih besar antara gelembung udara dan partikel; stabilitas lapisan *froth*; dan suspensi partikel dalam sel flotasi.

Ukuran Partikel;

Masalah lama yang belum teratasi dengan baik adalah flotasi untuk *fine particle* (38-13 μm) dan *ultrafine particle* (<13 μm). *Fine particle* dan *coarse particle* terlebih *ultrafine particle* menghasilkan performa yang buruk dibandingkan dengan ukuran menengah [15]. Alasan mengapa hal ini bisa terjadi adalah karena tiga karakteristik *fine particle* memiliki massa partikel yang rendah. Efeknya akan membuat lambatnya proses flotasi karena menurunnya probabilitas tubrukan dan adhesi antara gelembung udara dan partikel [16]. Selain itu, juga adanya luas area dan energi permukaan yang tinggi. Efeknya akan mempercepat proses oksidasi di permukaan partikel dan memperburuk selektivitas reagen [17].

Telah diketahui bahwa penyebab utama rendahnya kecepatan maupun *final recovery* dari *fine particle* yang hidrofobik (<20 μm) adalah rendahnya nilai efisiensi tubrukan (E_c). Nilai ini bisa ditingkatkan dengan menurunkan ukuran gelembung udara atau dengan menyatukan (*aggregating*) partikel halus dalam ukuran yang optimum untuk flotasi [18]. Penurunan ukuran gelembung udara tidak hanya meningkatkan nilai E_c gelembung udara-partikel, tetapi juga nilai efisiensi penempelannya serta jumlah gelembung udara yang dihasilkan.

Partikel yang berada dalam kondisi suspensi tidak akan terjadi penyatuan karena masih ada energi penghalang yang membuat jarak dan bisa terdispersi. Untuk menciptakan agregat partikel diperlukan adanya energi ekstra yang dikenakan pada partikel. Oleh karena itu, perlu meningkatkan energi kinetik yang dihasilkan dari agitasi mekanik oleh *impeller* dan mengatasi energi penghalang serta terjadi tubrukan yang efisien.

Energi pada Proses Flotasi

Dalam sel flotasi telah diketahui pembagian zona berdasarkan kondisi turbulensi yang terjadi di dalamnya atau aliran energi yang dikenakan pada partikel, yaitu *collection zone* dan *froth zone*. Aliran turbulen ini diciptakan oleh pergerakan *impeller* untuk pencampuran. Keseluruhan jumlah perolehan mineral berharga adalah fungsi dari kedua zona ini. Kedua zona ini menyajikan mekanisme sub-proses, yaitu *collision*, *attachment* dan *detachment* antara gelembung udara dan partikel. Dimana, ketiganya mempunyai probabilitas yang sangat menentukan probabilitas flotasi. Seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, probabilitas dari ketiga sub proses tersebut dipengaruhi oleh ukuran partikel, derajat hidrofobik partikel, dan energi eksternal [7].

Pada proses tubrukan, bisa dimungkinkan bahwa akan terjadi 100% efisiensi untuk partikel bertubrukan dengan gelembung udara. Namun, tidak semua partikel akan menempel pada gelembung udara karena proses *attachment* dibutuhkan perbedaan derajat hidrofobik dan ukuran yang dimiliki partikel. *Attachment* pun akan terjadi jika dengan adanya energi kinetik partikel untuk bergerak menuju gelembung udara dan bisa saja dihalangi oleh adanya energi penghalang untuk terjadi adhesi antara gelembung udara dan partikel. Oleh karena itu, perlu meningkatkan energi kinetik yang dihasilkan dari agitasi mekanik oleh *impeller* dan mengatasi energi penghalang untuk meningkatkan probabilitas *attachment* [19].

METODE PENELITIAN

Material yang digunakan untuk sampel penelitian ini adalah bijih yang ada di PTFI dari tambang terbuka Grasberg dengan tujuan didapatnya kesesuaian kondisi aktual pada umpan (*feed*)

untuk pengolahan di C3 dan C4. Penelitian dilakukan di Laboratorium Metalurgi, *Metallurgy Research and Development Section, Metallurgy Technical Service Department, Concentrating Division*, PT Freeport Indonesia, Tembagapura, Irian Jaya. Pada tahap persiapan sampel, masing-masing tipe ore (A, C, dan D) dari Grasberg dengan kode sampel berbeda dikenakan perlakuan mulai peremukan sampai karakterisasi umpan. Setelah diketahui karakter tiap tipe bijih, dilakukan pencampuran ketiga bijih tersebut hingga homogen serta mempunyai distribusi elemen yang bagus di setiap titik. Penelitian ini memanfaatkan 2 jenis pembagi yaitu *rotary* dan *riffle* untuk membagi sampel ke dalam plastik sama banyak dan diharapkan kandungan elemen setiap plastik sama. Sehingga didapatkan 60 plastik dengan berat masing-masing 400 gr. Pengecekan homogenitas sampel dilakukan setelah pembagian yang didapat dari 24 cup, diambil secara acak 3 sampel masing-masing 200 gr untuk karakterisasi umpan menggunakan pengujian XRD dan AAS. Jika hasilnya homogen, maka dilakukan penentuan waktu penggerusan agar didapat ukuran umpan flotasi yang sesuai target konsentrator 3 dan 4 yaitu 12% grind size +65#.

Tabel 1 Parameter proses percobaan flotasi

Parameter	Properti
Mesin flotasi	Denver D-12
Volume sel	2,4 L
Berat sampel	1400 gr
<i>Pulp Density</i>	42% Solid
Waktu penggerusan dan <i>Grind Size</i>	15:58 min. / 1,4 kg @ 65% solid dalam <i>ball mill</i> (17.5X19 cm, <i>ball charge</i> 7 kg), dan ukuran butir 12% +65 mesh.
Dosis reagent	AERO [®] 7249 Promoter : 3.5 gr/kg Cu. AERO [®] 317 Xanthate (SIBX) : 15 gr/ton. OrePrep [®] OTX-140 Frother : 15 gr/ton

Selanjutnya titik penambahan SIBX dan kecepatan *impeller* divariasikan sesuai dengan Tabel 2 untuk mendapatkan data agar dapat ditarik kesimpulan yang diharapkan dengan dilakukannya penelitian ini.

Tabel 2. Variasi yang dikenakan pada SIBX dan kecepatan *impeller*

Titik Penambahan SIBX	Kecepatan <i>Impeller</i> (rpm)	
	0-8 menit normal	0-4 menit normal, 4-8 menit tinggi
T1 = 0 menit	0-4 menit normal, 4-8 menit tinggi	0-4 menit tinggi, 4-8 menit normal
T2 = 2 menit	0-4 menit rendah, 4-8 menit tinggi	0-4 menit tinggi, 4-8 menit rendah
T3 = 4 menit	0-4 menit tinggi, 4-8 menit rendah	
T4 = 6 menit		

*Rendah 900 rpm ; Normal 1200 rpm ; Tinggi 1500 rpm

Dari variasi percobaan tersebut, harus dilakukan 20 test kinetika flotasi dengan dua kali duplikasi sebagai data statistik, maka total percobaan adalah 40 test. Percobaan flotasi dilakukan selama 8 menit dan akan menghasilkan 4 konsentrat dengan waktu penarikan tiap dua menit. Perolehan 4 konsentrat dan *tailing* dicari berat dan kandungan masing-masingnya setelah dilakukan filter dan pengeringan. Setelah itu, sekitar 200 gr konsentrat dan *tailing* direduksi ukurannya sebagai bahan karakterisasi XRD dan AAS menggunakan *pulverizing unit*. Dengan informasi itu, dapat ditentukan grafik hubungan *recovery* dan waktu, dan dapat diketahui titik penambahan SIBX dan kecepatan *impeller* untuk menghasilkan nilai *recovery* optimal. Dari *tailing* dan umpan yang tersedia, juga dilakukan analisis ukuran dan distribusi partikel untuk mengecek efektifitas perubahan pola kecepatan *impeller* untuk memberikan energi kinetik bagi partikel dalam berbagai

ukuran agar bisa bertubrukan dengan gelembung udara dan meningkatkan probabilitas koleksi mineral berharga, sehingga didapat *recovery* yang tinggi pada berbagai ukuran partikel.

HASIL PENELITIAN

Komposisi Kimia Umpan

Tabel 3 dan 4 menjelaskan hasil pengujian AAS dan XRD pada sampel umpan yang mengecek kandungan baik tembaga dan komposisi senyawa lainnya.

Tabel 3. Komposisi kimia hasil pengujian AAS Grasberg *composite ore*

No.	Kode Sampel	Analisis Awal dan Hasil Pengujian								
		% Cu	Au (ppm)	% Fe	% AsCu	% Pb	% Zn	% Insol	% S	Ag (ppm)
1	GRS cmp-Feed A1	0.990	1.771	9.160	0.043	0.0080	0.0097	62.68	8.680	4.3
2	GRS cmp-Feed B1	0.982	1.267	9.540	0.037	0.0073	0.0095	60.09	8.240	4.0
3	GRS cmp-Feed C1	0.963	1.049	9.050	0.044	0.0074	0.0085	54.23	7.600	4.3
4	GRS cmp-Feed A2	0.945	1.573	9.200	0.042	0.0062	0.0083	62.31	9.030	4.0
5	GRS cmp-Feed B2	0.961	1.822	9.450	0.034	0.0063	0.0080	59.19	8.560	3.9
6	GRS cmp-Feed C2	0.949	0.994	9.180	0.042	0.0068	0.0077	54.73	8.220	3.7

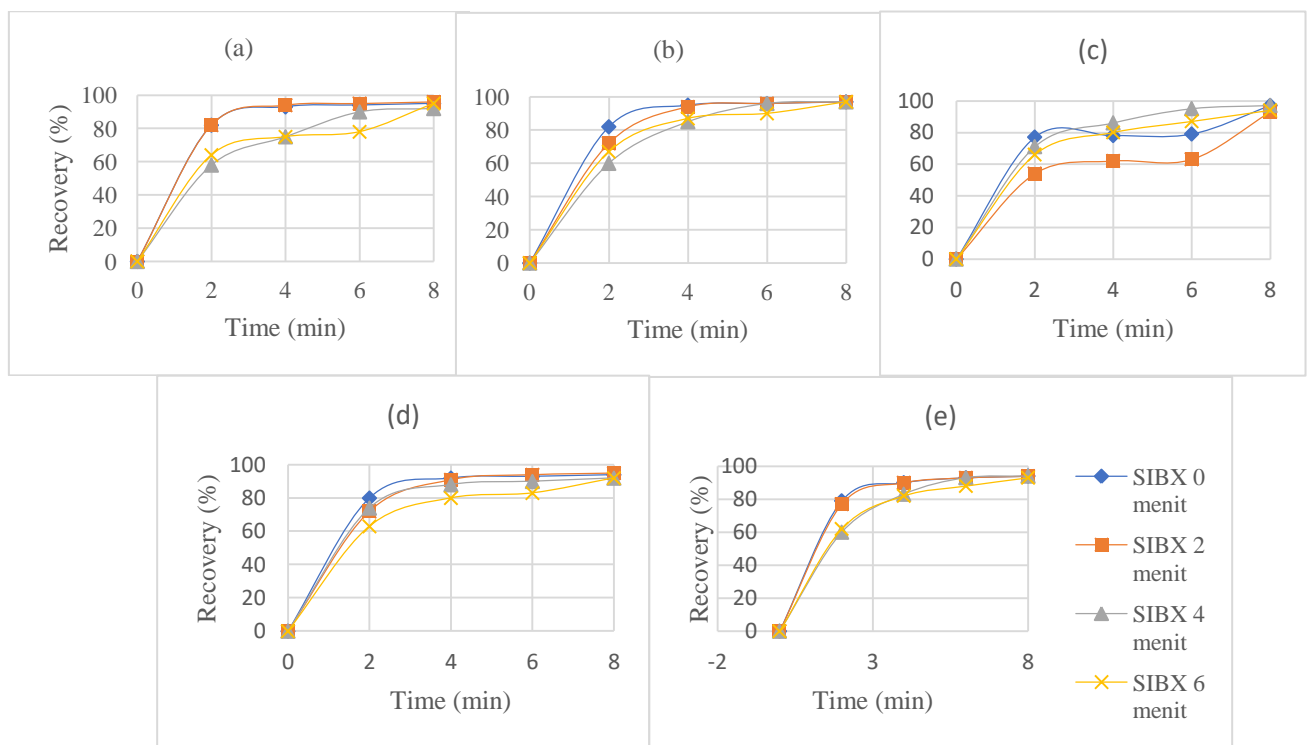
Tabel 4. Komposisi mineral yang terkandung dalam umpan hasil pengujian XRD

XRD Mineral Summary	Bulk Mineralogy		
	GRS-CMP FEEDA	GRS-CMP FEEDB	GRS-CMP FEEDC
Quartz, SiO ₂	24.0	25.1	24.4
Feldspar, (Na, K, Ca)AlSi ₃ O ₈	39.1	37.6	35.3
Andalusite/Vesuvianite/Epidote/Zeolite	1.7	1.6	1.6
Garnet	0.0	0.0	0.0
Olivine	0.0	0.0	0.0
Pyroxene	0.0	0.0	0.0
Carbonate (cal, dolo), CaCO ₃ /Ca, Mg(CO ₃) ₂	0.0	0.0	0.0
Sulfate (anhy, gyp, alunite), CaSO ₄ .2H ₂ O	10.5	11.0	9.6
Fe-Sulfide (pyr & mar), FeS ₂	9.7	8.9	9.6
Zn-Sulfide (sphalerite), ZnS	0.0	0.0	0.0
Pb-Sulfide (galena, PbS)	0.0	0.0	0.0
Molybdenite, MoS ₂	0.0	0.0	0.0
Cu-Sulfide (ch, cov, bor, dig)	2.4	2.5	2.4
Fe-Oxide (mag, hem, goe & wue), Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃ , FeOOH	2.3	2.2	3.1
Mica (mus, bio, phlog, clint)	7.9	9.8	12.8
Muscovite	3.3	4.8	8.9
Biotite	4.5	4.9	3.8
Total Clay	1.3	0.7	1.3
Kaolinite, Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	0.0	0.0	0.0
Clinchlore (chlorit), (Mg,Fe) ₅ Al(Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	1.3	0.7	1.3
Talc	0.0	0.0	0.0
Amphibole/Serpentine	1.0	0.6	0.0
Total	100	100	100
Sulfide Distribution			
Pyrite, FeS ₂	4.1	3.7	4.2
Marcasite, FeS ₂	0.0	0.0	0.0
Pyrrhotite, Fe _{1-x} S	5.6	5.2	5.4
Zn-Sulfide, ZnS	0.0	0.0	0.0

XRD Mineral Summary	Bulk Mineralogy		
	GRS-CMP FEEDA	GRS-CMP FEEDB	GRS-CMP FEEDC
Galena, PbS	0.0	0.0	0.0
Molybdenite, MoS ₂	0.0	0.0	0.0
Covellite, CuS	0.0	0.0	0.0
Bornite, Cu ₅ FeS ₄	0.0	0.0	0.0
Digenite/Chalcocite, Cu ₂ S	0.0	0.0	0.0
Chalcopyrite, CuFeS ₂	2.4	2.5	2.4

Grafik Kinetika Recovery Tembaga untuk Tiap Titik Penambahan SIBX

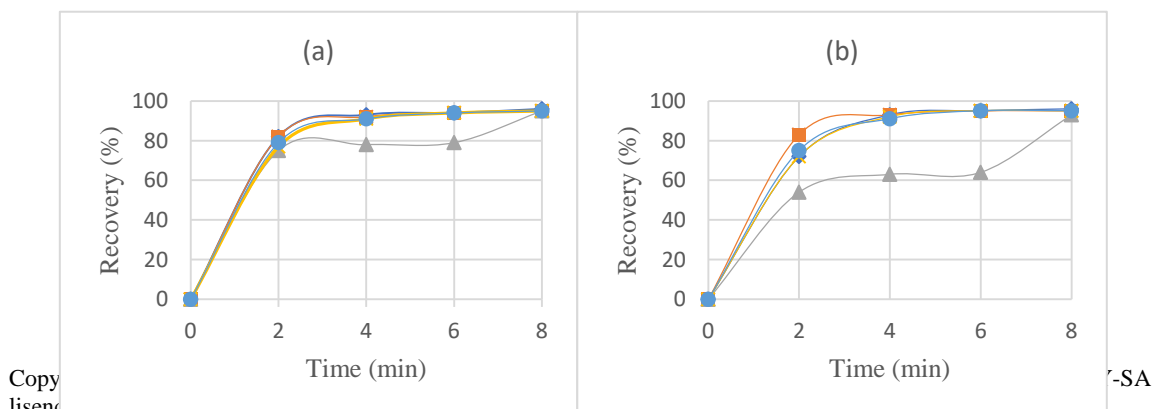
Selanjutnya akan ditunjukkan grafik hubungan recovery tembaga dan waktu untuk tiap titik penambahan pada tiap kecepatan impeller.

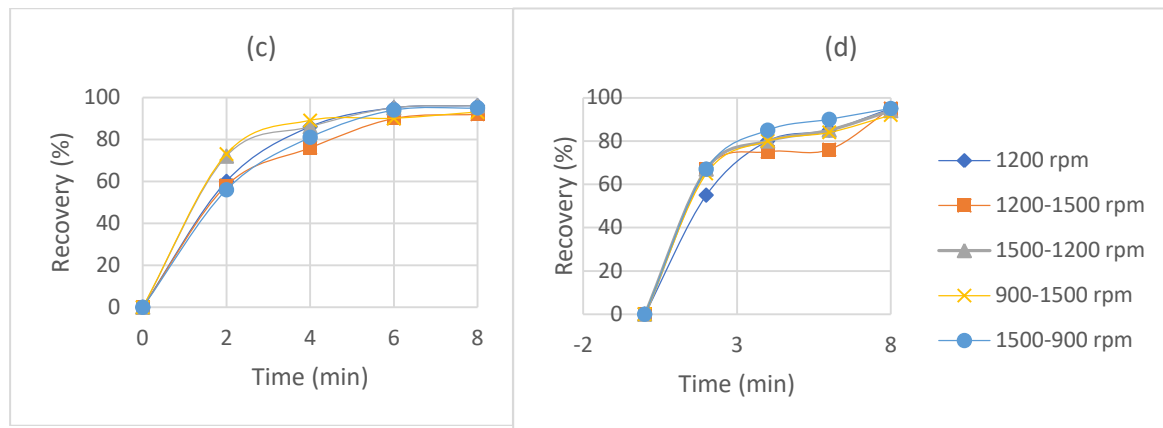


Gambar 1. Grafik kinetika recovery Cu dengan variasi titik penambahan SIBX pada berbagai kecepatan impeller (a) 1200 rpm (b) 1200 – 1500 rpm; (c) 1500 – 1200 rpm; (d) 900 – 1500 rpm; (e) 1500 – 900 rpm

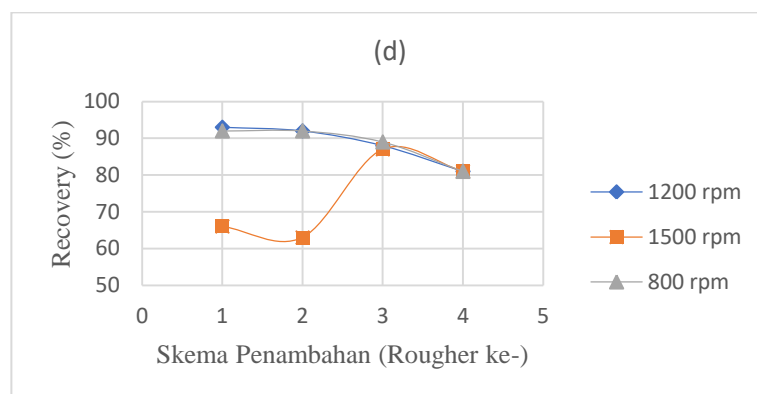
Grafik Kinetika Recovery Tembaga untuk Tiap Kecepatan Impeller

Selanjutnya akan ditunjukkan grafik hubungan recovery tembaga dan waktu untuk tiap kecepatan impeller pada tiap titik penambahan.



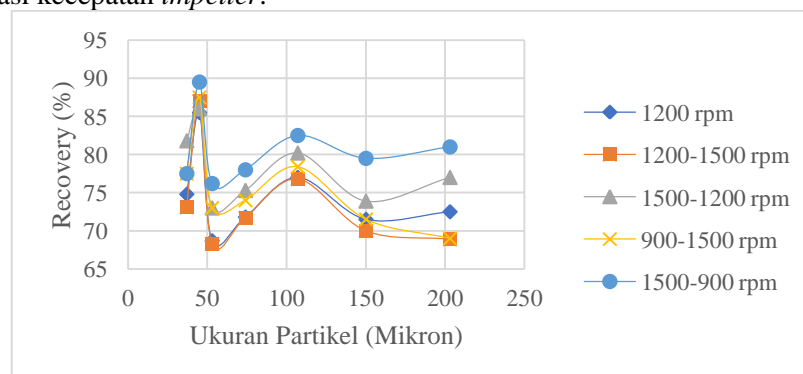


Gambar 2. Grafik kinetika recovery Cu dengan variasi kecepatan impeller pada berbagai titik penambahan SIBX (a) SIBX pada menit ke-0 (b) SIBX pada menit ke-2; (c) SIBX pada menit ke-4; (d) SIBX pada menit ke-6



Gambar 3. Grafik perbandingan nilai *recovery* tembaga pada variasi kecepatan impeller

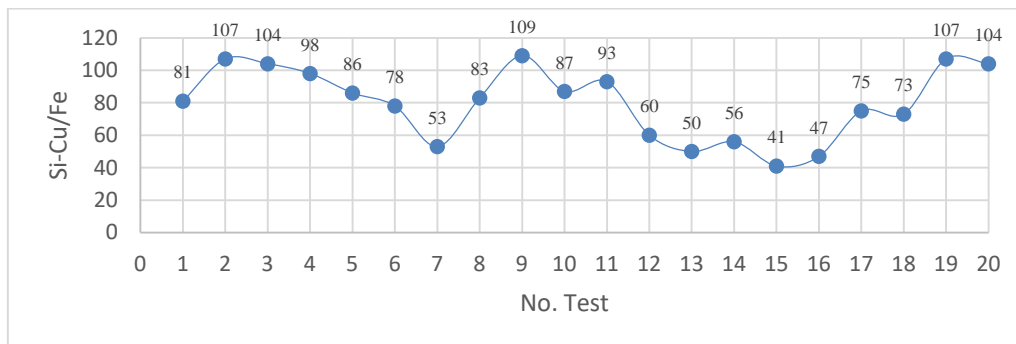
Gambar 4 berikut ini adalah grafik hubungan *recovery* dan ukuran partikel yang dihasilkan dari perlakuan variasi kecepatan *impeller*.



Gambar 4. Grafik hubungan *recovery* dan ukuran partikel

Indeks Selektivitas Flotasi Tembaga

Berikut ditunjukkan Gambar 5 yang menjelaskan perilaku separasi antara tembaga-besi dan emas-besi.



Gambar 5 Indeks selektivitas tembaga terhadap besi

Pengaruh Titik Penambahan SIBX pada *Recovery* Tembaga

Kecenderungan dari tiap variasi pola perubahan kecepatan *impeller*, SIBX yang menghasilkan urutan kecepatan *recovery* tembaga terbaik yang ditunjukkan oleh Gambar 1 yaitu pada 0 min, 2 min, 4 min dan yang terburuk 6 min. Hal tersebut dikarenakan adanya kemiringan garis yang paling besar pada titik penambahan menit ke-0 dibanding yang lainnya. Kemiringan tersebut dicapai karena banyaknya jumlah mineral mampu apung (*floatability*) dan bersifat hidrofobik yang ada dalam sel.

Tabel 5. *Mass recovery* untuk tiap konsentrasi (%) pada kecepatan *impeller* normal

1200 rpm	at 0 min	at 2 min	at 4 min	at 6 min
Con 1	13.91	13.08	11.73	12.57
Con 2	4.78	6.56	3.99	3.73
Con 3	3.75	4.79	6.06	4.07
Con 4	2.70	2.96	3.06	4.84

Dari Tabel 5 juga dapat diketahui bahwa SIBX yang ditambahkan akan berpengaruh pada peningkatan jumlah mineral hidrofobik pada konsentrasi berhubungan. Hal ini dicapai dengan proses dan jumlah penyerapan kolektor pada permukaan mineral. Proses penyerapan juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi sifat mampu apung dari mineral sulfida [20]. Artinya, SIBX akan membantu menambah jumlah partikel yang akan diapungkan dengan mengubah sifat kimia permukaan menjadi hidrofobik. SIBX yang ditambahkan bersamaan dengan Aerofloat 7249 akan bekerja sinergis menambah jumlah dan derajat hidrofobik partikel mineral.

Tabel 6. *Recovery* tembaga sampai pada menit ke-2

	Cu Rec Conc 1 (%)				
	N	NH	HN	LH	HL
0 min	82.68	82.79	75.64	79.22	77.1
2 min	72.42	83.26	53.96	72.13	75.53
4 min	60.46	58.41	72.24	73.77	56.42
6 min	54.92	66.47	66.06	63.77	62.88

Rendahnya kemiringan garis pada kurva lain disebabkan karena kolektor yang bekerja pada awal flotasi hanyalah Aerofloat 7249 sebagai kolektor primer. Kolektor ini mempunyai selektivitas yang baik dan hanya akan bereaksi dengan mineral chalcopyrite dan emas, sedangkan SIBX akan bereaksi dengan semua mineral sulfida [21].

Artinya, SIBX merupakan kolektor yang kuat tetapi tidak selektif dalam mengapungkan mineralnya [22]. Selain itu, SIBX yang sudah ditambahkan pun harus didukung oleh waktu pengkondisian dan juga penyerapan yang cukup untuk dapat terdistribusi dan terdispersi dalam pulp lalu terabsorpsi dengan baik ke permukaan mineral [23]. Penambahan SIBX pada awal proses memberikan waktu pengkondisian dan penyerapan yang lebih baik dibandingkan pada pertengahan atau bahkan akhir proses. Menambahkan SIBX pada akhir proses membuat mineral berharga yang

masih ada dan berpotensi untuk diapungkan tidak terambil dan terbuang dalam *tailing* karena masih tersisa SIBX yang berada dalam larutan dan tidak sempat terabsorpsi ke permukaan mineral.

Tabel 7. *Final recovery* tembaga tiap pengujian

	Cu Recovery (%)				
	N	NH	HN	LH	HL
0 min	96.069	94.845	96.526	94.124	95.363
2 min	96.693	95.847	93.009	94.733	95.497
4 min	96.660	91.647	96.333	92.483	95.241
6 min	95.651	94.737	94.090	92.033	94.143

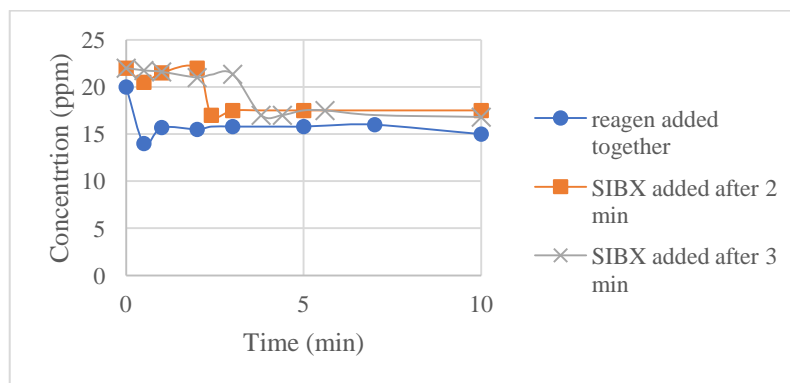
Nilai *recovery* akhir pada tiap percobaan flotasi tembaga menunjukkan nilai yang hampir sama yaitu rata-rata sekitar 94%, walaupun telah diketahui adanya perbedaan kecepatan *recovery*. Hal ini karena adanya kesamaan tipe bijih yang digunakan yaitu tipe A, C dan D dalam komposisi dan proses pencampuran yang baik.

Pengaruh Kecepatan *Impeller* pada *Recovery* Tembaga

Gambar 2 menunjukkan bahwa pada titik penambahan SIBX yang sama, perbedaan kecepatan *impeller* yang dikenakan cenderung tidak memberikan pengaruh pada kecepatan *recovery*. Perbedaan kecepatan *recovery* akan terlihat lebih jelas jika membandingkan titik penambahan SIBX yang berbeda. Artinya, kecepatan *recovery* tembaga dalam penelitian ini hanya dipengaruhi oleh sifat dan jumlah partikel hidrofobik. akibat komposisi partikel dan penambahan kolektor.

Berdasarkan Gambar 3, dapat diketahui bahwa penggunaan kecepatan *impeller* 1500 rpm, justru akan menurunkan *recovery* tembaga pada titik penambahan *rougher* pertama dan kedua. Sedangkan, pada 1200 rpm maupun 900 rpm nilainya cenderung sama. Ditemukan juga bahwa dengan menggunakan kecepatan *impeller* manapun tidak mengubah *recovery* pada titik penambahan *rougher* ketiga dan keempat.

Perbedaan terlihat karena kemunculan SIBX sebagai kolektor sekunder yang bisa berinteraksi dengan reagen lain. Sudah ditemukan bahwa keberadaan SIBX akan menurunkan konsentrasi *frother* yang ada di dalam pulp pada tiap titik penambahan dengan presentasi penurunan yang relative sama [24]. Hal itu dapat mengganggu stabilitas buih yang terbentuk, seperti dibuktikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Penurunan konsentrasi frother akibat penambahan SIBX [25]

Menurunnya konsentrasi frother menyebabkan udara terbentuk sebagai gelembung yang lebih besar dan dalam jumlah yang sedikit dengan kekuatan yang buruk, sehingga menurunkan *flotation rate constant* [26]. Dan jika gelembung seperti itu terkena kecepatan *impeller* yang tinggi, sangat dimungkinkan gelembung akan mudah pecah karena tidak kuat menahan turbulensi yang tercipta sehingga tidak tersedia media transportasi bagi mineral berharga untuk terapung sebagai konsentrat dan menurunkan nilai *recovery*. Lain halnya dengan penggunaan kecepatan *impeller* rendah dan normal, kemungkinan pecahnya gelembung akan sangat kecil terjadi dan menyebabkan tercapainya

recovery yang lebih optimal. Nilai *recovery* yang menurun seiring dengan penambahan SIBX yang semakin akhir pada penggunaan kecepatan *impeller* rendah dan normal disebabkan karena kekurangan kebutuhan kolektor untuk melapisi partikel mineral berharga. Dengan menurunnya jumlah partikel hidrofobik, maka akan berkurang juga mineral mampu apung.

Efektivitas Penggunaan Energi

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa yang memberikan peningkatan nilai *recovery* pada segala ukuran partikel adalah penggunaan kecepatan *impeller* yang polanya 1500 rpm pada awal dan berubah menjadi 800 rpm pada pertengahan hingga akhir proses flotasi. Energi kinetik yang dihasilkan dari agitasi mekanik oleh *impeller* berkecepatan 1500 rpm dapat mengatasi energi penghalang serta terjadi tumbukan yang efisien baik antara partikel kasar dan halus ataupun sesama partikel halus serta interaksi gelembung dan partikel.

Aerofloat 7249 yang merupakan campuran dari *mixture of diisobutyl monothiophosphate* (MTP) and *diisobutyl dithiophosphate* (DTP) berkontribusi untuk meningkatkan stabilitas froth [28]. Oleh karena itu, efek negatif SIBX terhadap penurunan stabilitas gelembung bisa saja diminimalisasi sehingga penggunaan kecepatan *impeller* 1500 rpm pada awal proses bisa dipertimbangkan. Dengan stabilitas gelembung yang baik bisa didapat *recovery* solid dan air yang lebih baik. Walaupun berpotensi ikut terapungnya gangue yang terperangkap di antara gelembung (*entrainment*) dan dapat menurunkan kadar konsentrat yang diperoleh. Sedangkan, penggunaan kecepatan *impeller* 800 rpm dibuktikan dari Gambar 4 dan 3 telah cukup untuk terjadinya tumbukan dan penempelan partikel hidrofobik dan mengoptimalkan *recovery* dibanding dengan kecepatan *impeller* 1200 rpm.

Selektivitas Flotasi Tembaga

Berdasarkan Gambar 8, selektivitas tembaga dalam melawan besi cenderung didapatkan hasil yang baik pada setiap pola perubahan kecepatan *impeller* dan titik penambahan SIBX pada menit ke-0. Telah diketahui bahwa nilai *recovery* akhir tembaga cenderung sama yaitu pada kisaran 94%. Artinya, perbedaan nilai SI menggambarkan kadar konsentrat yang diperoleh. Nilai kadar tertinggi didapat dengan penambahan SIBX menit ke-0 dan perlakuan kecepatan *impeller* 1500 rpm pada awal dan berubah 1200 rpm pada pertengahan hingga akhir proses flotasi.

Penggunaan dua tipe kolektor telah diketahui membawa banyak keuntungan dibanding satu kolektor. Aerofloat 7249 dan SIBX adalah dua kolektor yang berbeda kekuatan dan selektivitasnya, membuat pencampuran keduanya dapat meningkatkan efisiensi gelembung dan sifat hidrofobik partikel. Mencampurkan dan memberikan waktu pengkondisian bagi keduanya telah dibuktikan lebih menguntungkan.

KESIMPULAN

1. Kecenderungannya dengan tiap variasi pola perubahan kecepatan *impeller*, SIBX yang menghasilkan kecepatan *recovery* yang terbaik pada tembaga yaitu pada 0 min, 2 min, 4 min dan yang terburuk 6 min.
2. Penambahan SIBX pada awal proses akan memberikan waktu pengkondisian dan penyerapan yang lebih baik dibandingkan pada pertengahan atau bahkan akhir proses.
3. Penggunaan kecepatan *impeller* 1500 rpm, justru akan menurunkan *recovery* tembaga pada titik penambahan *rougher* pertama dan kedua. Sedangkan, pada 1200 rpm maupun 900 rpm nilainya cenderung sama. Penggunaan kecepatan *impeller* manapun tidak mengubah *recovery* tembaga pada titik penambahan *rougher* ketiga dan keempat tetapi dengan nilai yang lebih rendah.
4. Perlakuan yang memberikan nilai *recovery* paling optimal pada segala ukuran partikel adalah penggunaan kecepatan *impeller* yang polanya 1500 rpm pada awal dan berubah menjadi 800 rpm pada pertengahan hingga akhir proses flotasi.
5. Selektivitas tembaga dalam melawan besi cenderung didapatkan hasil yang baik pada setiap pola perubahan kecepatan *impeller* dan titik penambahan SIBX pada menit ke-0.
6. Kecepatan *recovery* tembaga dalam penelitian ini hanya dipengaruhi oleh sifat dan jumlah partikel hidrofobik akibat komposisi partikel dan penambahan kolektor. Namun tidak dipengaruhi oleh kecepatan *impeller*.

7. Nilai *recovery* akhir tembaga pada tiap percobaan menunjukkan nilai yang sama yaitu rata-rata sekitar 94%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Lin *et al.*, "Optimize flotation process of Mo–Bi sulfide ore for cleaner production," *J. Clean. Prod.*, vol. 291, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125236.
- [2] Freeport-McMoRan, "Technical Report Summary of Mineral Reserves and Mineral Resources of Grasberg minerals district. Papua, Indonesia," pp. 1–79, 2021, [Online]. Available: <https://fcx.com/sites/fcx/files/documents/operations/TRS-ptfi.pdf?d=20220217>.
- [3] W. Linsong *et al.*, "Copper recovery from copper slags through flotation enhanced by sodium carbonate synergistic mechanical activation," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 3, p. 107671, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.107671.
- [4] L. Reyes-Bozo *et al.*, "Use of humic substances in froth flotation processes," *J. Environ. Manage.*, vol. 252, no. October, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109699.
- [5] T. Holness, "Scholarship @ Western An investigation of the adsorption mechanism of an aliphatic nitrile (TECFLOTE S11) on sulphide mineral surfaces .," 2020.
- [6] X. Meng *et al.*, "Comparison of the reduction of chemical oxygen demand in wastewater from mineral processing using the coagulation–flocculation, adsorption and Fenton processes," *Miner. Eng.*, vol. 128, no. January, pp. 275–283, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.09.009.
- [7] C. 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, doi: 10.1016/j.powtec.2021.10.004.
- [8] D. 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, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107220.
- [9] D. Mesa, A. J. Morrison, and P. R. Brito-Parada, "The effect of impeller-stator design on bubble size: Implications for froth stability and flotation performance," *Miner. Eng.*, vol. 157, no. July, p. 106533, 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106533.
- [10] Y. Chen, L. Zhuang, and Z. Zhang, "Effect of particle shape on particle-bubble interaction behavior: A computational study using discrete element method," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 653, no. 11, p. 130003, 2022, doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.130003.
- [11] H. Darabi, S. M. J. Koleini, D. Deglon, B. Rezai, and M. Abdollahy, "Investigation of bubble-particle attachment, detachment and collection efficiencies in a mechanical flotation cell," *Powder Technol.*, vol. 375, pp. 109–123, 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2020.07.085.
- [12] M. J. Cole, J. E. Dickinson, and K. P. Galvin, "Recovery and cleaning of fine hydrophobic particles using the Reflux™ Flotation Cell," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 240, no. October 2019, p. 116641, 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2020.116641.
- [13] D. 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, doi: 10.1016/j.cherd.2020.05.029.
- [14] H. Wang *et al.*, "Enhancement of coal flotation using impact flow conditioning pulp," *J. Clean. Prod.*, vol. 267, p. 122124, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122124.
- [15] M. Bilal *et al.*, "The Challenges and Prospects of Recovering Fine Copper Sulfides from Tailings Using Different Flotation Techniques: A Review," *Minerals*, vol. 12, no. 5, 2022, doi: 10.3390/min12050586.
- [16] S. Farrokhpay, L. Filippov, and D. Fornasiero, "Flotation of Fine Particles: A Review," *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 42, no. 7, pp. 473–483, 2021, doi: 10.1080/08827508.2020.1793140.
- [17] Q. Luo, Q. Shi, D. Liu, B. Li, and S. Jin, "Effect of deep oxidation of chalcopyrite on surface properties and flotation performance," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 907–914, 2022, doi: 10.1016/j.ijmst.2022.06.007.
- [18] M. Bilal *et al.*, "Heterogenous carrier flotation technique for recovering finely ground

- chalcopryrite particles using coarse pyrite particles as a carrier,” *Miner. Eng.*, vol. 180, no. January, p. 107518, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107518.
- [19] D. Mesa, K. Cole, M. R. van Heerden, and P. R. Brito-Parada, “Hydrodynamic characterisation of flotation impeller designs using Positron Emission Particle Tracking (PEPT),” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 276, no. May, p. 119316, 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2021.119316.
- [20] A. Hassanzadeh, M. Safari, D. H. Hoang, H. Khoshdast, B. Albijanic, and P. B. Kowalczyk, “Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems,” *Miner. Eng.*, vol. 180, no. March, p. 107509, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107509.
- [21] R. Dunne, *Flotation of Gold and Gold-Bearing Ores*. Elsevier B.V., 2016.
- [22] X. Huang, K. Huang, Y. Jia, S. Wang, Z. Cao, and H. Zhong, “Investigating the selectivity of a xanthate derivative for the flotation separation of chalcopryrite from pyrite,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 205, pp. 220–229, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.04.051.
- [23] C. I. Castellón, N. Toro, E. Gálvez, P. Robles, W. H. Leiva, and R. I. Jeldres, “Froth Flotation of Chalcopryrite/Pyrite Ore: A Critical Review,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/ma15196536.
- [24] G. Zeng, W. Chen, S. Liu, and G. Liu, “Journal of Colloid and Interface Science New insights into the aggregation and disaggregation between serpentine and pyrite in the xanthate flotation system,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 633, pp. 243–253, 2023, doi: 10.1016/j.jcis.2022.11.123.
- [25] S. Özün and G. Ergen, “Determination of Optimum Parameters for Flotation of Galena: Effect of Chain Length and Chain Structure of Xanthates on Flotation Recovery,” *ACS Omega*, vol. 4, no. 1, pp. 1516–1524, 2019, doi: 10.1021/acsomega.8b02841.
- [26] A. R. Sarhan, J. Naser, and G. Brooks, “Effects of particle size and concentration on bubble coalescence and froth formation in a slurry bubble column,” *Particuology*, vol. 36, pp. 82–95, 2018, doi: 10.1016/j.partic.2017.04.011.
- [27] X. Yang, Y. Mu, and Y. Peng, “Comparing lead and copper activation on pyrite with different degrees of surface oxidation,” *Miner. Eng.*, vol. 168, no. May, p. 106926, 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.106926.
- [28] M. D. and A. G. Corby, “Ores and Concentrates,” *Icmm*, pp. 1–11, 2009.