

STUDI PENGARUH VARIASI PH DAN KOLEKTOR PADA EFISIENSI FLOTASI MINERAL TEMBAGA SULFIDA

Kostiawan Sukamto^{1*}, Astin Lukum², Akram La Kilo³

^{1,2,3}Jurusan Kimia, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Jend. Sudirman No. 6, Kota Gorontalo, 96128I, Indonesia

*E-mail: kostiawan_sukamto@ung.ac.id

Riwayat Article

Received: 25 March 2025; Received in Revision: 27 March 2025; Accepted: 28 March 2025

Abstract

This study aims to investigate the effect of pH variations and collector types on the recovery efficiency and Cu content in copper sulfide mineral samples. The experiment was conducted by varying the pH (6, 8, 10, and 12) and using different types of collectors, namely Xanthate, Potassium Amyl Xanthate (PAX), Diethyl Dithiophosphate (DTP), and a combination of PAX + DTP. Control variables included flotation time (5, 10, 15, 20, and 25 minutes), collector concentration at 50 mg/L, particle size <75 μm , and the use of Frother Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) at a concentration of 10 mg/L. Modifiers such as NaOH and H₂SO₄ were used to adjust the pH, while Copper Sulfate (CuSO₄) served as an activator and Sodium Metabisulfite (Na₂S₂O₅) as a depressant. The results showed that variations in pH and collector types significantly influenced recovery efficiency and Cu content in the concentrate. In general, the highest recovery efficiency was achieved at pH 10 with the combination of PAX + DTP, which resulted in a higher Cu content compared to other single collectors. This combination was able to improve recovery efficiency to over 75%, with Cu content in the concentrate reaching 28%. Therefore, the findings suggest the use of a collector combination and pH optimization as strategies to enhance the performance of copper sulfide flotation.

Keywords: flotation, copper sulfide, pH, collectors

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi pH dan jenis kolektor terhadap efisiensi *recovery* dan kadar Cu dalam sampel mineral tembaga sulfida. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan pH (6, 8, 10, dan 12) serta menggunakan berbagai jenis kolektor, yaitu *Xanthate*, *Potassium Amyl Xanthate* (PAX), *Diethyl Dithiophosphate* (DTP), dan kombinasi PAX + DTP. Selain itu, variabel kontrol yang diterapkan meliputi waktu flotasi (5, 10, 15, 20, dan 25 menit), konsentrasi kolektor sebesar 50 mg/L, ukuran partikel <75 μm , serta penggunaan *Frother Methyl Isobutyl Carbinol* (MIBC) dengan konsentrasi 10 mg/L. Modifier seperti NaOH dan H₂SO₄ digunakan untuk mengatur pH, sementara *Copper Sulfate* (CuSO₄) berfungsi sebagai aktivator dan *Sodium Metabisulfite* (Na₂S₂O₅) sebagai *depressant*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi pH dan jenis kolektor memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi *recovery* dan kadar Cu dalam konsentrat. Secara umum, efisiensi *recovery* tertinggi dicapai pada pH 10 dengan penggunaan kombinasi PAX + DTP, yang menghasilkan kadar Cu yang lebih tinggi dibandingkan kolektor tunggal lainnya. Kombinasi ini mampu meningkatkan efisiensi *recovery* hingga lebih dari 75% dengan kadar Cu dalam konsentrat mencapai 28%. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan rekomendasi untuk penggunaan kombinasi kolektor dan optimasi pH sebagai strategi untuk meningkatkan performa proses flotasi tembaga sulfida.

Keywords: flotasi, tembaga sulfida, pH, kolektor

1. Introduction

Produksi tembaga menghadapi tantangan karena adanya penurunan kualitas bijih tembaga yang dieksploitasi, sehingga diperlukan metode pengolahan yang lebih efisien dan selektif. Flotasi merupakan salah satu metode pemisahan mineral yang paling umum digunakan dalam pengolahan bijih sulfida, termasuk tembaga sulfida. Proses flotasi mineral merupakan metode pemisahan mineral berdasarkan perbedaan sifat permukaan partikel mineral dalam medium air. Prinsip dasarnya memanfaatkan sifat hidrofobik dan hidrofilik dari partikel mineral melalui

interaksi kimia-fisika (Cao et al., 2018; Fuerstenau & Pradip, 2019). Proses ini melibatkan pembentukan gelembung udara di dalam *pulp* mineral yang menyebabkan partikel mineral berharga menempel pada permukaan gelembung dan naik ke permukaan sebagai konsentrat, sedangkan partikel *gangue* tetap berada dalam *slurry* (Mondal et al., 2021; Yang, Tong, et al., 2021). Metode ini telah diakui secara luas karena efisiensinya dalam meningkatkan kadar logam pada konsentrat dengan biaya yang relatif rendah dan penerapan yang fleksibel pada berbagai jenis bijih mineral (Langa et al., 2014; Merzeg et al., 2023).

Proses flotasi mineral tembaga sulfida sangat bergantung pada kondisi fisikokimia dalam *pulp* flotasi, di antaranya pH larutan, jenis dan dosis reagen, serta waktu pengkondisian untuk meningkatkan tingkat perolehan mineral berharga (Cui et al., 2015; Sekhar, 2023). pH memainkan peran krusial dalam proses flotasi karena mempengaruhi permukaan partikel mineral, sifat hidrofobitasnya, serta reaktivitas kimia dari kolektor. pH berperan dalam mengatur muatan permukaan mineral, yang dapat mempengaruhi kemampuan kolektor dalam berinteraksi dengan mineral tersebut (Dhar et al., 2019; Jimenez et al., 2024; Matsuoka et al., 2020). Setiap mineral memiliki titik isoelektrik yang berbeda, yang menentukan pH optimal di mana mineral tersebut akan memiliki muatan yang tepat untuk berinteraksi dengan kolektor (Huangfu et al., 2023; Micheau et al., 2023). Titik isoelektrik adalah pH pada saat suatu partikel atau mineral dalam larutan memiliki muatan netral atau tidak bermuatan. Pada titik ini, gaya elektrostatik antara partikel dan kolektor tidak cukup kuat untuk menarik atau menolak satu sama lain (Lu et al., 2020; Neuppmann & Luz, 2025; Wu et al., 2017). Dalam penelitian sebelumnya, pH netral hingga basa sering kali memberikan hasil yang lebih baik pada flotasi tembaga sulfida, karena pada pH ini permukaan mineral sulfida lebih mudah berikatan dengan kolektor yang bersifat anionik seperti *xanthate* (Bulut et al., 2021; El-Midany et al., 2015; Hou et al., 2020).

Selain pH, jenis kolektor juga memainkan peran yang sangat penting dalam proses flotasi. Kolektor adalah senyawa organik yang digunakan untuk meningkatkan sifat hidrofobik mineral target dan memfasilitasi perlekatannya ke gelembung udara dalam sel flotasi, sehingga mineral tersebut dapat mengapung dan terpisah dari mineral pengotor. Beberapa senyawa yang dapat digunakan sebagai kolektor diantaranya *Xanthate*, *Potassium Amyl Xanthate*, dan *Diethyl Dithiophosphate* (Feng et al., 2014; Han et al., 2018a; Rezaee et al., 2017). Efektivitas kolektor ditentukan oleh struktur kimianya, karakteristik penyerapan, dan mineralogi spesifik bijih yang sedang diproses (Mcfadzean et al., 2012; Özün & Ulutaş, 2019). Mekanisme utama fungsi kolektor melibatkan adsorpsi gugus polar kolektor ke situs aktif di permukaan mineral, sementara rantai hidrofobiknya yang panjang akan menjauh dari air dan masuk ke dalam larutan, sehingga mineral menjadi lebih hidrofobik dan dapat dipisahkan dengan lebih mudah (Kang & Zhang, 2022; Pan et al., 2021).

Jenis dan konsentrasi kolektor yang digunakan merupakan faktor penting dalam meningkatkan efisiensi flotasi, karena secara langsung memengaruhi perolehan dan selektivitas mineral berharga selama proses flotasi (Kamoda & Sanwani, 2023; Wati et al., 2022). Kolektor yang berbeda akan berinteraksi secara berbeda dengan mineral sulfida pada pH yang berbeda pula, sehingga analisis yang mendalam mengenai kompatibilitas kedua variabel ini sangat penting untuk mengoptimalkan proses flotasi (Subandrio et al., 2022). *Xanthate* merupakan jenis kolektor yang paling umum digunakan karena efektif dalam meningkatkan hidrofobitas mineral sulfida (İzerdem & Ertekin, 2024; Shen et al., 2016). Varian lain seperti *Potassium Amyl Xanthate* (PAX) dan *Diethyl Dithiophosphate* (DTP) memiliki sifat yang berbeda dalam hal daya tarik terhadap mineral sulfida dan kestabilan kimia pada berbagai pH (Ge et al., 2013; Yang, Xie, et al., 2021). Kombinasi PAX dan DTP seringkali digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan, terutama pada kondisi bijih yang kompleks atau sulit diolah. Dalam penelitian ini, kombinasi diuji untuk mengamati efek sinergis yang potensial dalam meningkatkan efisiensi recovery dan kadar tembaga pada konsentrat. Kolektor PAX diketahui memiliki daya tarik yang kuat terhadap mineral sulfida, sementara DTP memberikan kestabilan dan efisiensi yang lebih tinggi pada kondisi pH basa.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi pH dan jenis kolektor pada efisiensi flotasi mineral tembaga sulfida, dengan fokus pada interaksi antara parameter-parameter tersebut. Studi ini juga akan mengevaluasi pengaruh kondisi pH yang berbeda terhadap kapasitas kolektor dalam meningkatkan pemisahan tembaga sulfida dari mineral pengotor. Melalui analisis yang mendalam mengenai faktor-faktor ini, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi yang lebih baik mengenai kondisi operasi yang optimal dalam proses flotasi tembaga sulfida.

2. Methodology

2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), sel flotasi, lumpang dan alu, peralatan gelas, ayakan, serta oven. Sampel yang digunakan adalah Enargit (Cu_3AsS_4), yang berasal dari tambang yang terletak di Suwawa Timur, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo. Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain H_2SO_4 , NaOH, *Methyl Isobutyl Carbinol* (MIBC), *Copper Sulfate* (CuSO_4), *Sodium Metabisulfite* ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), *Sodium Silicate* (Na_2SiO_3), serta kolektor (*Xanthate*, *Potassium Amyl Xanthate* (PAX), dan *Diethyl Dithiophosphate* (DTP)).

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1 Preparasi Sampel

Proses preparasi dimulai dengan pengeringan sampel pada suhu ruang. Langkah ini bertujuan untuk menghilangkan kelembapan alami pada bijih yang dapat memengaruhi proses flotasi, terutama dalam hal daya rekat mineral terhadap kolektor. Setelah kering, sampel dihaluskan menggunakan alat penggerus hingga mencapai ukuran partikel $<75 \mu\text{m}$. Setelah penghalusan, sampel dihomogenisasi menggunakan metode *coning and quartering*. Metode ini dilakukan dengan cara menumpuk sampel pada permukaan datar dalam bentuk kerucut (*coning*), kemudian membaginya menjadi empat bagian (*quartering*). Dua bagian yang berlawanan diambil, sementara dua bagian lainnya disisihkan. Langkah ini dilakukan beberapa kali untuk memastikan representasi yang konsisten dari keseluruhan sampel, sehingga hasil pengujian analisis tidak bias oleh variasi sifat mineral dalam sampel.

2.2.2 Proses Flotasi

Proses flotasi dilakukan menggunakan sel flotasi berkapasitas 1 liter dengan berat sampel sebanyak 250 gram untuk setiap pengujian. Sampel bijih tembaga sulfida yang telah disiapkan dengan ukuran partikel $<75 \mu\text{m}$ dimasukkan ke dalam sel flotasi yang telah diisi air. Larutan flotasi disiapkan dengan menambahkan *frother* (MIBC) pada konsentrasi 10 mg/L, *activator* (CuSO_4) sebesar 10 mg/L untuk meningkatkan daya rekat kolektor pada mineral sulfida, *depressant* ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) pada konsentrasi 30 mg/L untuk mencegah pyrite terikat dalam flotasi, dan *dispersant* (Na_2SiO_3) 15 mg/L untuk menjaga stabilitas partikel dalam suspensi. Selanjutnya, pH larutan diatur menggunakan H_2SO_4 untuk pH 6 dan NaOH untuk pH 8, 10, dan 12. Dalam penelitian ini, H_2SO_4 dan NaOH digunakan untuk mengatur pH larutan flotasi karena lebih praktis, murah, dan mudah didapat dibandingkan dengan larutan *buffer*. Kedua senyawa ini juga lebih efektif dalam mengatur pH dalam rentang yang lebih luas, yang penting untuk memastikan interaksi optimal antara kolektor dan mineral sulfida selama proses flotasi. Penggunaan H_2SO_4 dan NaOH memungkinkan kontrol pH yang cepat dan presisi, yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi optimal bagi efektivitas kolektor dalam meningkatkan efisiensi flotasi

Setelah pH mencapai nilai yang diinginkan, kolektor ditambahkan sesuai jenis yang sedang diuji, yaitu *Xanthate*, PAX, DTP, atau kombinasi PAX + DTP, dengan konsentrasi tetap 50 mg/L. Proses flotasi dimulai dengan menyalakan agitator pada sel flotasi pada kecepatan standar untuk menghasilkan gelembung udara yang akan berinteraksi dengan partikel mineral sulfida tembaga. Proses flotasi dilakukan dalam lima waktu berbeda, yaitu 5, 10, 15, 20, dan 25 menit, untuk mengamati pengaruh durasi terhadap efisiensi *recovery* dan kadar Cu dalam konsentrat.

Setelah flotasi selesai, produk konsentrat dikumpulkan dari permukaan sel flotasi, sementara *tailing* (mineral pengotor) diambil dari bagian bawah. Konsentrat yang diperoleh kemudian dikeringkan dan dianalisis untuk menentukan efisiensi *recovery* (%) dan kadar Cu (%) menggunakan metode analisis standar.

2.2.3 Analisis Data

Efisiensi *recovery* (%) dihitung berdasarkan massa dan kadar Cu dalam konsentrat dibandingkan dengan kadar Cu dalam sampel awal, menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi Recovery (\%)} = \left(\frac{M_c \times C_c}{M_s \times C_s} \right) \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

M_c : Massa konsentrat (gram)

C_c : Kadar Cu dalam konsentrat (%)

M_s : Massa sampel awal (gram)

C_s : Kadar Cu dalam sampel awal (%)

Kadar Cu (%) dalam konsentrat dihitung berdasarkan analisis kimia terhadap massa konsentrat yang dihasilkan. Kadar ini diperoleh dari alat analisis AAS, menggunakan persamaan berikut:

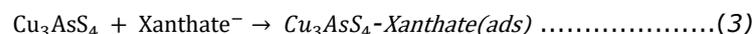
$$\text{Kadar Cu (\%)} = \left(\frac{\text{Massa Cu dalam konsentrat}}{\text{Massa total konsentrat}} \right) \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

3. Results and Discussion

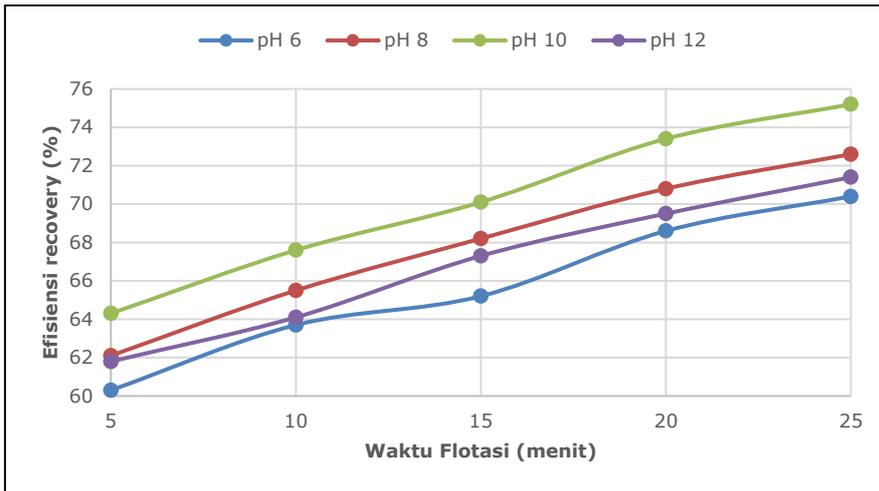
3.1. Penggunaan Kolektor *Xanthate*

Xanthate digunakan dalam proses flotasi konsentrat tembaga sulfida karena memiliki sifat kimia yang sangat efektif sebagai kolektor mineral sulfida. Salah satu alasan utama adalah kemampuannya menginduksi hidrofobisitas pada permukaan mineral sulfida, seperti tembaga sulfida (*chalcopyrite* dan *enargite*), sehingga partikel mineral dapat menempel pada gelembung udara dan terangkat ke permukaan selama proses flotasi. Selain itu, *xanthate* memiliki selektivitas tinggi terhadap mineral sulfida dibandingkan dengan *gangue* yang umumnya berupa oksida atau silikat, sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan dan menghasilkan konsentrat dengan kadar tembaga yang lebih tinggi. *Xanthate* juga dikenal karena stabilitasnya dalam berbagai kondisi pH, terutama pada rentang netral hingga basa (pH 8-12), di mana ion *xanthate* dapat dengan mudah berinteraksi dengan permukaan mineral sulfida untuk membentuk senyawa kompleks yang memperkuat efisiensi flotasi (Han et al., 2018b; Yuan et al., 2023).

Hasil penelitian pada Gambar 1 menunjukkan bahwa efisiensi *recovery* meningkat secara konsisten seiring dengan bertambahnya durasi flotasi pada semua pH yang diuji (6, 8, 10, dan 12). Peningkatan ini menunjukkan bahwa waktu yang lebih lama memberikan peluang lebih besar bagi mineral sulfida untuk berinteraksi dengan kolektor dan terangkat sebagai konsentrat. Efisiensi *recovery* tertinggi dicapai pada pH 10, yang menunjukkan angka sekitar 75,2% pada waktu flotasi 25 menit. Sebaliknya, efisiensi *recovery* lebih rendah terlihat pada pH 6, yakni sekitar 70,4% pada durasi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa pH 10 adalah kondisi optimal yang mendukung interaksi maksimal antara kolektor *Xanthate* dan partikel mineral sulfida, sementara pada pH 6 interaksi ini kurang efektif karena sifat kimia permukaan mineral yang kurang kondusif pada pH tersebut. Reaksi yang terjadi antara kolektor *Xanthate* dan mineral tembaga sulfida dalam sampel adalah sebagai berikut:

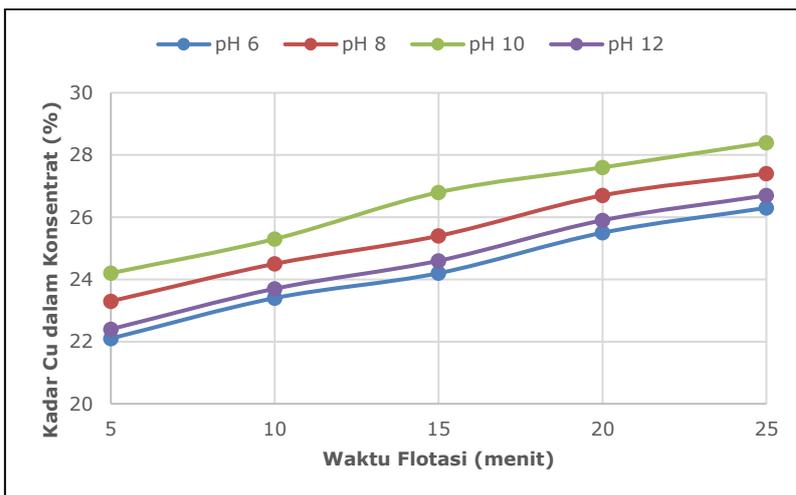


Kolektor *xanthate*, yang bersifat anionik, berinteraksi dengan permukaan mineral sulfida yang bermuatan positif, membentuk senyawa kompleks yang hidrofobik dan memungkinkan mineral tersebut mengapung dalam proses flotasi (Gaudin & Schuhmann, 1936). Di sini, ion *xanthate* (Xanthate^-) mengadsorpsi pada permukaan mineral Enargit (Cu_3AsS_4), mengubah permukaan mineral menjadi lebih hidrofobik, memungkinkan mineral tersebut berikatan dengan gelembung udara selama proses flotasi (pers. 3). Ion *xanthate* juga dapat bereaksi dengan ion tembaga (Cu^{2+}) pada mineral Enargit, membentuk kompleks yang lebih stabil, yang meningkatkan interaksi dengan kolektor (pers.4). Reaksi ini menggambarkan pembentukan kompleks antara ion tembaga dan *xanthate*, yang memfasilitasi pemisahan Enargit dari mineral pengotor dalam flotasi.



Gambar 1. Efisiensi *recovy* dari proses flotasi menggunakan kolektor *xanthate*

Kadar tembaga dalam konsentrat meningkat seiring bertambahnya waktu flotasi pada semua pH yang diuji. Nilai tertinggi untuk kadar Cu dicapai pada pH 10, yakni 28,4% pada waktu flotasi 25 menit. Hal ini menegaskan bahwa pH 10 memberikan kondisi optimal untuk selektivitas pemisahan Cu dari mineral pengotor, yang memungkinkan hasil konsentrat dengan kadar Cu yang lebih tinggi. Pada pH 6, kadar Cu hanya mencapai 26,3% pada waktu yang sama, menunjukkan bahwa sifat permukaan mineral sulfida pada pH ini kurang mendukung interaksi optimal dengan kolektor. Menariknya, meskipun pH 12 menghasilkan efisiensi *recovery* yang cukup baik, kadar Cu dalam konsentrat sedikit lebih rendah dibandingkan pH 10. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi terlalu basa mungkin mengurangi selektivitas terhadap Cu, meskipun proses flotasi tetap berlangsung efektif.

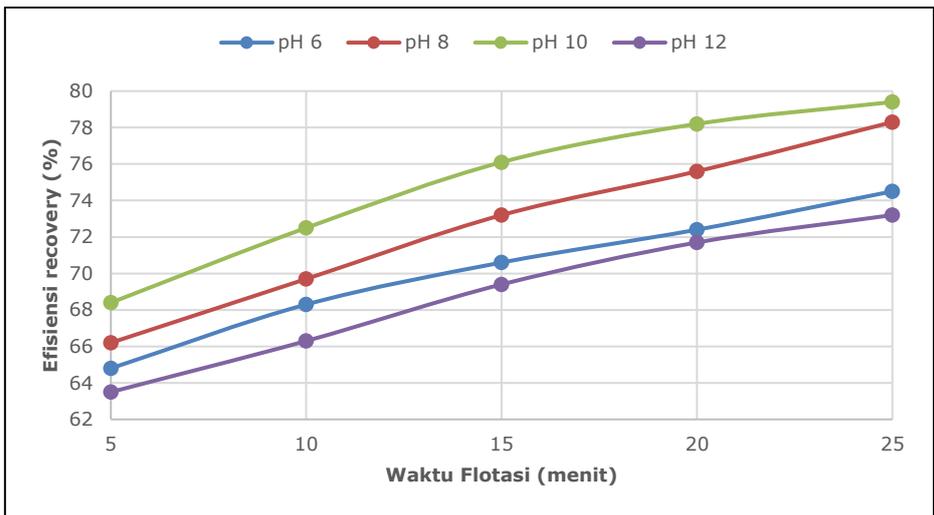
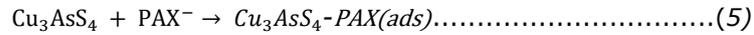


Gambar 2. Kadar tembaga dari proses flotasi menggunakan kolektor *xanthate*

3.2. Penggunaan Kolektor *Potassium Amyl Xanthate* (PAX)

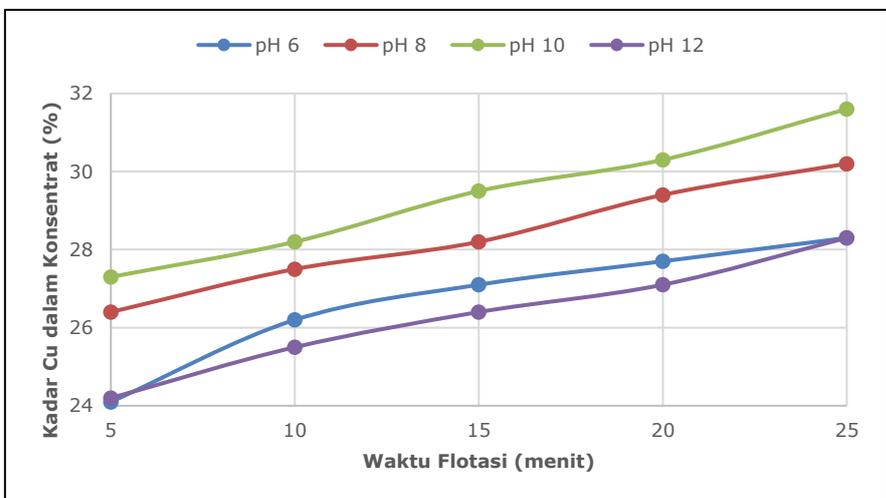
PAX menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan dengan *Xanthate* dalam proses flotasi mineral tembaga sulfida. Berdasarkan grafik efisiensi *recovery* (Gambar 3) dan kadar tembaga terhadap waktu (Gambar 4) pada berbagai pH untuk kolektor PAX, terlihat bahwa PAX memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan *Xanthate*. Keunggulan PAX terutama disebabkan oleh struktur kimianya yang memiliki rantai karbon lebih panjang, sehingga meningkatkan hidrofobisitasnya (Bararunyeretse et al., 2019; Özün & Ergen, 2019). Hidrofobisitas yang lebih tinggi memungkinkan interaksi yang lebih efektif antara kolektor dan mineral sulfida, sehingga meningkatkan efisiensi *recovery* dan kadar tembaga dalam konsentrat.

Pada grafik efisiensi *recovery*, terlihat bahwa PAX memberikan hasil tertinggi pada pH 10, mencapai 79,4% setelah 25 menit flotasi. Hal ini menunjukkan bahwa PAX bekerja lebih optimal dalam kondisi pH ini dibandingkan *Xanthate*, yang memiliki efisiensi *recovery* maksimum sebesar 75,2% pada kondisi yang sama. PAX juga menunjukkan kinerja yang konsisten baik pada pH 8 maupun pH 6, meskipun tetap sedikit lebih rendah dibandingkan hasil pada pH 10. Untuk kolektor PAX, reaksi yang terjadi pada mineral Enargit akan mirip dengan reaksi yang terjadi pada *xanthate*, tetapi dengan peningkatan efisiensi karena struktur rantai karbon PAX yang lebih panjang, yang meningkatkan hidrofobisitas dan interaksi antara kolektor dan mineral.



Gambar 3. Efisiensi *recovery* dari proses flotasi menggunakan kolektor PAX

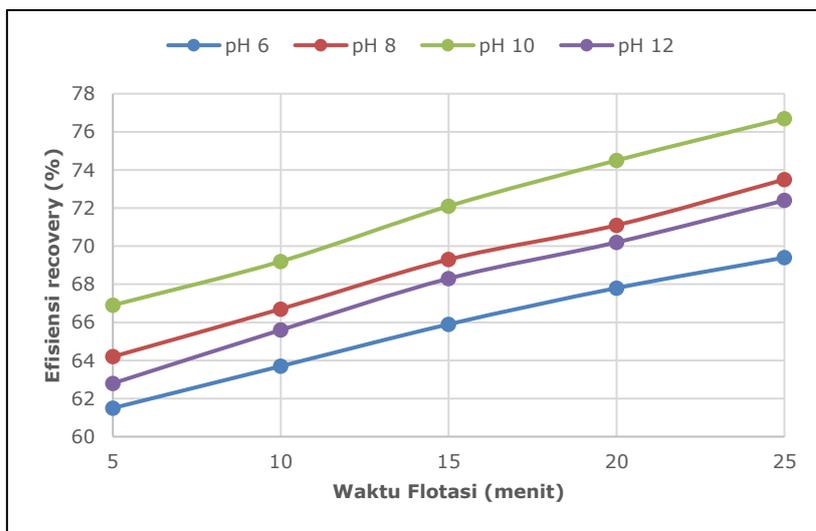
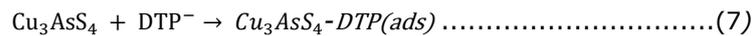
Grafik kadar tembaga memperkuat temuan ini, dimana PAX menghasilkan kadar tembaga hingga 31,6% pada pH 10, sementara *Xanthate* hanya mencapai 28,4% pada kondisi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa PAX memiliki selektivitas yang lebih baik terhadap mineral tembaga, memisahkannya secara lebih efisien dari mineral pengotor. Selain itu, peningkatan kadar tembaga pada PAX terlihat lebih signifikan pada semua pH, mencerminkan kemampuannya untuk memaksimalkan pemisahan tembaga dalam waktu flotasi yang sama.



Gambar 4. Kadar tembaga dari proses flotasi menggunakan kolektor PAX

3.3. Penggunaan Kolektor *Diethyl Dithiophosphate (DTP)*

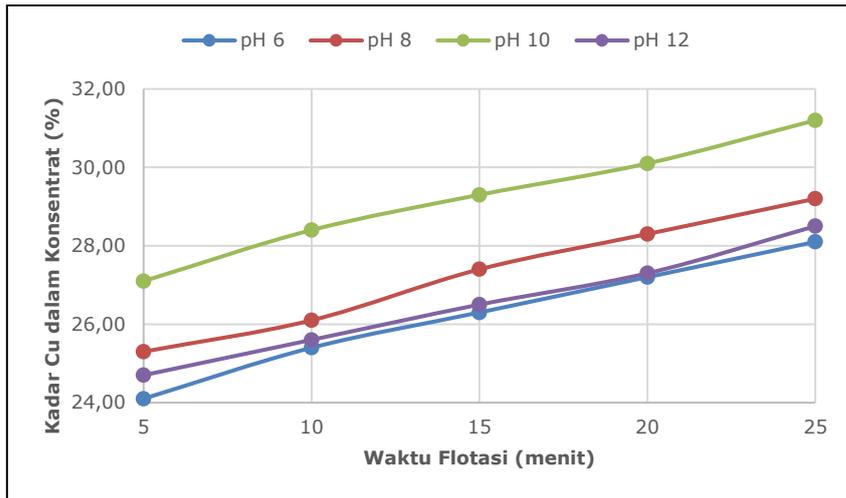
Berdasarkan grafik efisiensi *recovery* dan kadar tembaga untuk kolektor DTP, terlihat bahwa DTP memiliki performa yang lebih baik dibandingkan *Xanthate*, tetapi masih di bawah PAX. DTP menunjukkan kemampuan yang lebih unggul dari *Xanthate* karena sifat kimianya yang lebih selektif terhadap mineral sulfida, terutama tembaga (Petrus et al., 2011). Pada pH 10, efisiensi *recovery* dengan DTP mencapai 76,7%, lebih tinggi dari *Xanthate* yang hanya mencapai 75,2% pada waktu flotasi yang sama. Begitu pula dengan kadar tembaga, DTP menghasilkan kadar hingga 31,2%, lebih baik dari *Xanthate* yang hanya mencapai 28,4%. Hal ini disebabkan oleh kemampuan DTP untuk membentuk ikatan kimia yang lebih stabil dan selektif dengan ion tembaga, sehingga meningkatkan kualitas konsentrat. Untuk kolektor DTP, reaksi yang terjadi pada mineral Enargit akan melibatkan pembentukan kompleks antara DTP dan ion tembaga pada permukaan mineral. DTP lebih selektif dibandingkan dengan *xanthate* dan PAX karena memiliki sifat kimia yang lebih stabil pada pH basa dan kemampuan untuk berinteraksi lebih kuat dengan ion tembaga (Dhar et al., 2019).



Gambar 5. Efisiensi *recovery* dari proses flotasi menggunakan kolektor DTP

Dari grafik, terlihat bahwa pH 10 memberikan efisiensi *recovery* tertinggi, mencapai setelah 25 menit flotasi. Hal ini menunjukkan bahwa DTP bekerja paling optimal pada pH 10, seperti halnya kolektor lainnya. Pada pH 8, efisiensi *recovery* juga cukup baik, mencapai 73,5% setelah 25 menit, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan pH 10. Sebaliknya, pada pH 6 dan pH 12, efisiensi *recovery* lebih rendah, masing-masing hanya mencapai 69,4% dan 72,4%. Tren ini menunjukkan bahwa efektivitas DTP sebagai kolektor lebih dipengaruhi oleh kondisi pH basa, yang mendukung interaksi optimal antara kolektor dan mineral sulfida, menghasilkan *recovery* yang lebih tinggi.

Meskipun DTP memiliki selektivitas yang baik terhadap ion tembaga dan bekerja dengan baik pada pH basa, PAX menghasilkan efisiensi flotasi yang lebih tinggi dan kadar tembaga yang lebih tinggi dalam konsentrat. Kolektor PAX mampu mencapai efisiensi *recovery* sebesar 79,4% dan kadar tembaga hingga 31,6% pada pH 10 dengan waktu flotasi yang sama. Kelebihan PAX ini disebabkan oleh struktur kimianya yang memiliki rantai karbon lebih panjang dibandingkan DTP, sehingga meningkatkan hidrofobitasnya dan menghasilkan interaksi yang lebih kuat dengan mineral sulfida. Peningkatan hidrofobitas ini memungkinkan PAX untuk melapisi permukaan mineral dengan lebih baik, sehingga meningkatkan keterikatan pada gelembung udara selama proses flotasi (Ding et al., 2024; Petrus et al., 2011). Selain itu, PAX menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menjaga kestabilan selektivitas terhadap tembaga pada berbagai pH, sementara DTP cenderung menurun efisiensinya pada pH selain pH 10.



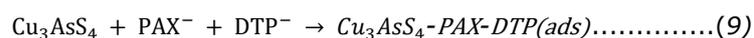
Gambar 6. Kadar tembaga dari proses flotasi menggunakan kolektor DTP

Dari grafik di atas, terlihat bahwa pH 10 memberikan kadar tembaga tertinggi, mencapai 31,2% setelah 25 menit flotasi. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi pH ini optimal untuk kolektor DTP dalam meningkatkan selektivitas terhadap mineral tembaga. Pada pH 8, kadar tembaga juga cukup tinggi, mencapai 29,20% setelah 25 menit flotasi. Sebaliknya, pada pH 6 dan pH 12, kadar tembaga lebih rendah, masing-masing hanya mencapai 28,1% dan 28,5%. Perbedaan ini menegaskan bahwa DTP bekerja lebih efektif pada kondisi basa, dengan pH 10 sebagai titik optimal untuk menghasilkan konsentrat tembaga berkadar tinggi. Grafik ini mencerminkan keunggulan DTP dalam meningkatkan kualitas konsentrat pada kondisi pH tertentu yang mendukung interaksinya dengan mineral sulfida.

Secara keseluruhan, DTP merupakan pilihan yang lebih baik dibandingkan *Xanthate* karena selektivitasnya yang lebih tinggi terhadap mineral tembaga, tetapi PAX tetap menjadi kolektor terbaik karena efisiensi *recovery* dan kadar tembaganya yang lebih unggul dalam berbagai kondisi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa PAX lebih cocok untuk aplikasi flotasi tembaga yang membutuhkan hasil maksimal, sedangkan DTP bisa menjadi alternatif pada kondisi yang lebih spesifik.

3.4. Penggunaan Kombinasi Kolektor PAX dan DTP

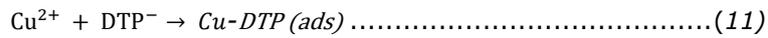
Kombinasi PAX dan DTP menghasilkan performa flotasi yang lebih baik dibandingkan penggunaan kolektor tunggal seperti PAX, DTP, maupun *Xanthate*. Keunggulan ini disebabkan oleh sifat sinergis kedua kolektor yang saling melengkapi, sehingga meningkatkan efisiensi *recovery* dan kadar tembaga dalam konsentrat. PAX memiliki struktur kimia dengan rantai karbon panjang yang memberikan hidrofobisitas tinggi pada permukaan mineral sulfida, sementara DTP dikenal karena selektivitasnya yang tinggi terhadap ion tembaga. Kombinasi ini memungkinkan interaksi yang lebih kuat dengan partikel tembaga sulfida, sekaligus meminimalkan interaksi dengan mineral gangue atau pengotor (Chen et al., 2017; Yang, Xie, et al., 2021). Berikut adalah reaksi yang mungkin terjadi antara sampel Enargit dan kombinasi kolektor PAX dan DTP:



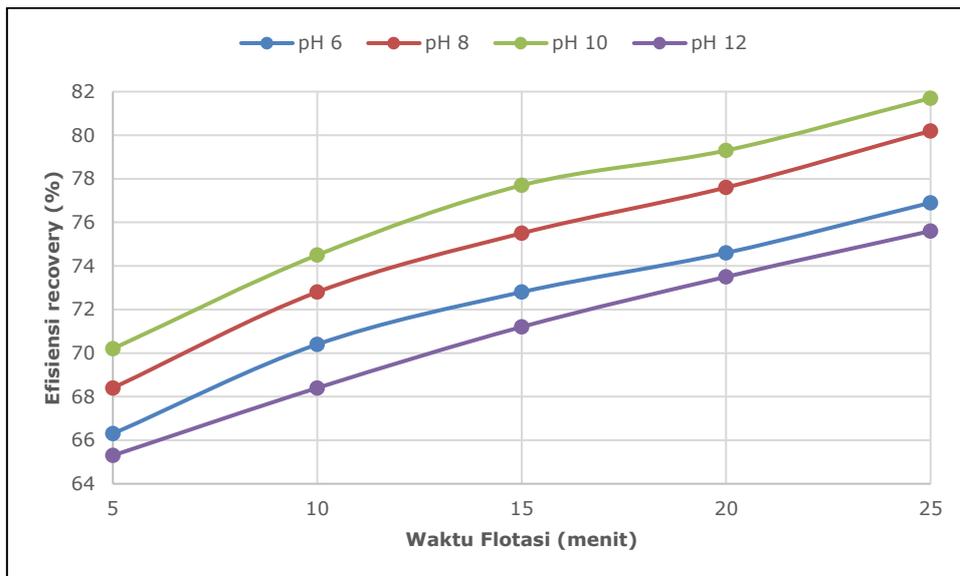
Ion dari PAX dan DTP mengadsorpsi pada permukaan mineral Enargit, meningkatkan hidrofobisitas dan selektivitasnya. Reaksi ini memungkinkan interaksi yang lebih kuat antara mineral dan gelembung udara selama flotasi. Di sini, kedua kolektor bekerja bersama-sama pada permukaan mineral, dengan PAX meningkatkan hidrofobisitas mineral dan DTP memperbaiki selektivitas terhadap ion tembaga, yang memungkinkan mineral terangkat lebih efisien dalam proses flotasi.

PAX dan DTP dapat membentuk kompleks dengan ion tembaga pada permukaan mineral Enargit, meningkatkan kemampuan kolektor untuk mengikat mineral dan mempercepat proses pemisahan tembaga dari mineral pengotor. Dengan kombinasi kedua kolektor ini, tembaga pada mineral

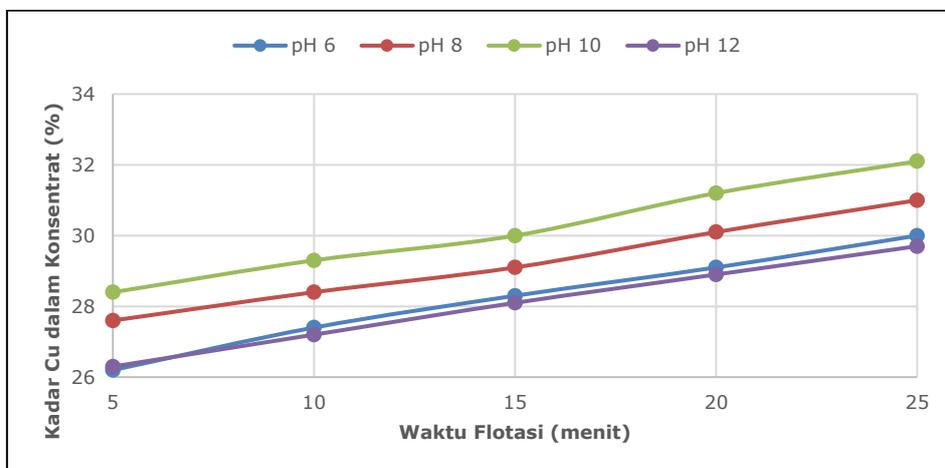
Enargit akan terikat lebih kuat dengan kedua kolektor tersebut, menghasilkan kompleks yang lebih stabil dan lebih mudah dipisahkan melalui flotasi.



Kombinasi kedua kolektor ini memberikan hasil yang sangat baik, terutama pada pH 10, dimana efisiensi *recovery* mencapai 81,7% setelah 25 menit flotasi. Pada pH ini, PAX bekerja sangat efektif dalam membentuk lapisan hidrofobik pada permukaan mineral sulfida, sementara DTP tetap stabil dan selektif terhadap ion tembaga. Kondisi ini menghasilkan sinergi yang optimal, di mana kedua kolektor bekerja bersama untuk meningkatkan kualitas konsentrat. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi PAX dan DTP mampu memaksimalkan performa kolektor dibandingkan penggunaan masing-masing kolektor secara terpisah. Grafik efisiensi *recovery* menunjukkan bahwa kombinasi PAX dan DTP setelah 25 menit flotasi, lebih tinggi dibandingkan penggunaan terpisah antara kedua kolektor yang masing-masing, PAX (79,4%) dan DTP (76,7%). Begitu pula pada kadar tembaga, kombinasi ini mampu mencapai 32,1%, jauh lebih baik dibandingkan PAX (31,6%) maupun DTP (31,2%).



Gambar 7. Efisiensi *recovery* dari proses flotasi menggunakan kombinasi kolektor PAX dan DTP



Gambar 8. Kadar tembaga dari proses flotasi menggunakan kombinasi kolektor PAX dan DTP

Keunggulan PAX dalam meningkatkan hidrofobisitas partikel mineral mempermudah penempelan partikel sulfida pada gelembung udara selama proses flotasi, menghasilkan *recovery* yang lebih

tinggi. Di sisi lain, DTP membentuk kompleks kimia yang lebih stabil dengan ion tembaga di permukaan mineral, sehingga meningkatkan selektivitas pemisahan tembaga dari mineral lain. Ketika kedua kolektor digunakan secara bersamaan, kelebihan masing-masing kolektor digabungkan, sehingga menghasilkan efisiensi recovery dan kadar tembaga yang lebih tinggi dibandingkan jika hanya salah satu kolektor digunakan.

Kelebihan lain dari kombinasi PAX dan DTP adalah kemampuannya dalam menghadapi tantangan bijih dengan komposisi mineral kompleks. Sifat PAX yang fleksibel dalam menempel pada berbagai mineral sulfida, ditambah dengan selektivitas tinggi DTP, menjadikan kombinasi ini ideal untuk pengolahan bijih dengan kandungan *gangue* tinggi. Kombinasi ini juga memperluas jangkauan aplikasi flotasi, memungkinkan pemrosesan bijih dalam berbagai kondisi pH tanpa penurunan signifikan pada efisiensi *recovery* atau kadar konsentrat. Dengan demikian, kombinasi PAX dan DTP adalah solusi yang lebih baik untuk flotasi tembaga sulfida karena menggabungkan kekuatan masing-masing kolektor, menciptakan sinergi yang meningkatkan hasil flotasi secara signifikan. Hal ini membuat kombinasi tersebut menjadi pilihan optimal untuk menghasilkan konsentrat tembaga berkualitas tinggi, dengan efisiensi proses yang lebih baik dibandingkan kolektor tunggal.

4. Conclusion

Berdasarkan hasil penelitian, variasi pH dan jenis kolektor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi flotasi dan kadar tembaga pada konsentrat. Peningkatan efisiensi *recovery* tercatat seiring dengan bertambahnya waktu flotasi, dengan pH 10 dan kombinasi kolektor PAX + DTP menghasilkan efisiensi *recovery* tertinggi yang mencapai 81,7%, serta kadar tembaga dalam konsentrat yang mencapai 32,1%. Kombinasi kolektor PAX + DTP menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan kolektor tunggal, memberikan sinergi yang optimal dalam meningkatkan pemisahan tembaga sulfida dari mineral pengotor.

References

- Bararunyeretse, P., Beckford, H. O., & Ji, H. (2019). Interactive Effect of Copper and Its Mineral Collectors on Soil Microbial Activity—A Microcalorimetric Analysis. *Open Journal of Soil Science*, 09(03), 47–64.
- Bulut, G., Sirkeci, A. A., & Ari, B. (2021). Comparison of Anionic, Cationic and Amphoteric Collectors Used in Pyrite Flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(5), 15–22.
- Cao, S., Cao, Y., Ma, Z., & Liao, Y. (2018). Metal Ion Release in Bastnaesite Flotation System and Implications for Flotation. *Minerals 2018*, Vol. 8, Page 203, 8(5), 203.
- Chen, Y., Shi, Q., Feng, Q., Lu, Y., & Zhang, W. (2017). The Effect of Conditioning on the Flotation of Pyrrhotite in the Presence of Chlorite. *Minerals*, 7(7).
- Cui, C. F., Xian, Y. J., Wen, S. M., & Wang, Y. J. (2015). Investigation on Copper Flotation from a Complex Copper Ore, Yunnan Province. *Advanced Materials Research*, 1094, 389–392.
- Dhar, P., Thornhill, M., & Kota, H. R. (2019). Investigation of Copper Recovery from a New Copper Ore Deposit (Nussir) in Northern Norway: Dithiophosphates and Xanthate-Dithiophosphate Blend as Collectors. *Minerals 2019*, Vol. 9, Page 146, 9(3), 146.
- Ding, M., Liu, Y., Chen, J., & Li, Y. (2024). DFT study on the effects of substituents on the structure and properties of dithiophosphate collectors. *International Journal of Quantum Chemistry*, 124(4), e27355.
- El-Midany, A. A., Arafat, Y., & El-Faris, T. F. (2015). Rice starch as a depressant in phosphate reverse flotation. *Starch - Stärke*, 67(9–10), 745–751.
- Feng, Q. C., Wen, S. M., Xian, Y. J., Wang, Y. J., & Zhao, W. J. (2014). Influence of Flotation Reagents on Utilization of Complex and Refractory Lead Oxide Ores. *Advanced Materials Research*, 868, 408–411.
- Fuerstenau, D. W., & Pradip. (2019). A Century of Research Leading to Understanding the Scientific Basis of Selective Mineral Flotation and Design of Flotation Collectors. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 36(1), 3–20.

- Gaudin, A. M., & Schuhmann, R. (1936). The action of potassium n-amyl xanthate on chalcocite. *The Journal of Physical Chemistry*, 40(2), 257–275.
- Ge, B., Liu, S., Nie, Q., Li, Q., & Zhu, C. (2013). Applying One-Stage Grinding and Flotation to Improving Copper Recovery of a Fine-Grained Cu-Mo Sulphide Ore. *Separation Science and Technology*, 48(12), 1900–1905.
- Han, G., Su, S., Huang, Y., Peng, W., Cao, Y., & Liu, J. (2018a). An Insight into Flotation Chemistry of Pyrite with Isomeric Xanthates: A Combined Experimental and Computational Study. *Minerals 2018*, Vol. 8, Page 166, 8(4), 166.
- Han, G., Su, S., Huang, Y., Peng, W., Cao, Y., & Liu, J. (2018b). An Insight into Flotation Chemistry of Pyrite with Isomeric Xanthates: A Combined Experimental and Computational Study. *Minerals*, 8(4).
- Hou, Y., Sobhy, A., & Wang, Y. (2020). Significance of reagents addition sequence on iron anionic reverse flotation and their adsorption characteristics using QCM-D. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(1), 284–293.
- Huangfu, M. ;, Hu, Y. ;, Zhou, Y. ;, Li, M. ;, Deng, J. ;, Li, S. ;, Peng, G., Matis, K. A., Sierra Fernández, C., Huangfu, M., Hu, Y., Zhou, Y., Li, M., Deng, J., Li, S., & Peng, G. (2023). Flotation Characteristics of Amphibole-Type Oxidized Iron Ore via Reverse Anionic Flotation. *Processes 2023*, Vol. 11, Page 2388, 11(8), 2388.
- İzderdem, D., & Ertekin, Z. (2024). In Situ Characterization of the Locked Particle Behavior of Sulfide Minerals Using Non-Destructive Electrochemical Measurements. *Deu Muhendislik Fakultesi Fen Ve Muhendislik*, 26(77), 255–263.
- Jimenez, G., Cabrera, P., Rodriguez, A., Cuervo, C., & Gutierrez, L. (2024). The Effect of an Anionic Polyacrylamide on the Flotation of Chalcopyrite, Enargite, and Bornite. *Minerals 2024*, Vol. 14, Page 634, 14(7), 634.
- Kamoda, R., & Sanwani, E. (2023). Flotasi kasiterit dari bijih timah primer tipe skarn asal pulau belitung. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 19(3), 141–161.
- Kang, H., & Zhang, H. (2022). Enhanced Flotation Separation of Low-Rank Coal with a Mixed Collector: Experimental and Molecular Dynamics Simulation Study. *ACS Omega*, 7(38), 34239–34248.
- Langa, N. T. N., Adeleke, A. A., Mendonidis, P., & Thubakgale, C. K. (2014). Evaluation of sodium isobutyl xanthate as a collector in the froth flotation of a carbonatitic copper ore. *International Journal of Industrial Chemistry*, 5(3–4), 107–110.
- Lu, Y., Liu, W., Wang, X., Cheng, H., Cheng, F., & Miller, J. D. (2020). Lauryl Phosphate Flotation Chemistry in Barite Flotation. *Minerals 2020*, Vol. 10, Page 280, 10(3), 280.
- Matsuoka, H., Mitsuhashi, K., Kawata, M., & Tokoro, C. (2020). Derivation of Flotation Kinetic Model for Activated and Depressed Copper Sulfide Minerals. *Minerals 2020*, Vol. 10, Page 1027, 10(11), 1027.
- Mcfadzean, B., Castelyn, D. G., & O’connor, C. T. (2012). The effect of mixed thiol collectors on the flotation of galena. *Minerals Engineering*, 36–38, 211–218.
- Merzeg, F. A., Bezzi, N., Bouzidi, N., Narsis, S., Bait, N., Ladj, R., & Bachari, K. (2023). Reverse flotation process in double stage on the Algerian phosphate ore treatment. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 61–66.
- Micheau, C., Ueda, Y., Motokawa, R., Bauduin, P., Girard, L., & Diat, O. (2023). Foam Flotation of Clay Particles Using a Bifunctional Amine Surfactant. *Langmuir*, 39(31), 10965–10977.
- Mondal, S., Acharjee, A., Mandal, U., & Saha, B. (2021). Froth flotation process and its application. *Vietnam Journal of Chemistry*, 59(4), 417–425.
- Neuppmann, P. H., & Luz, J. A. M. da. (2025). Physicochemical aspects of anionic flotation in the hematite/dolomite/quartz system. *Caderno Pedagógico*, 22(1), e13216.
- Özün, S., & Ergen, G. (2019). Determination of Optimum Parameters for Flotation of Galena: Effect of Chain Length and Chain Structure of Xanthates on Flotation Recovery. *ACS Omega*, 4(1), 1516–1524.

- Özün, S., & Ulutaş, Ş. (2019). Interfacial Behavior of Anionic/Cationic Flotation Collectors in Mixed Aqueous Solutions and Their Effect on Flotation Recovery of Quartz. *Journal of Surfactants and Detergents*, 22(1), 61–71.
- Pan, G., Zou, D., & Wang, Z. (2021). Flotation of Smithsonite From Quartz Using Pyrophyllite Nanoparticles as the Natural Non-toxic Collector. *Frontiers in Chemistry*, 9, 743482.
- Petrus, H. T. B. M., Hirajima, T., Sasaki, K., & Okamoto, H. (2011). Study of diethyl dithiophosphate adsorption on chalcopyrite and tennantite at varied pHs. *Journal of Mining Science*, 47(5), 695–702.
- Rezaee, B., Sarvi, A., Eslamian, A., MehdiJebraeli, S., & Zabihi, A. (2017). Sulfur reduction in Sangan iron ore by flotation. *E3S Web of Conferences*, 18, 01023.
- Sekhar, S. C. (2023). Process for Concentration of Low Grade Copper Ore - A Process Design. *Journal of Chemistry: Education Research and Practice*, 7(1), 473–476.
- Shen, Y., Nagaraj, D. R., Farinato, R., & Somasundaran, P. (2016). Study of xanthate decomposition in aqueous solutions. *Minerals Engineering*, 93, 10–15.
- Subandrio, S., Palit, C., Marwanza, I., I., E. F. B., & Juradi, M. I. (2022). Pengaruh Fraksi Ukuran dan pH Pada Flotasi Mineral Sulfida. *Jurnal Geomine*, 10(1), 13–20.
- Wati, D. R., Subandrio, Dahani, W., & Palit, C. (2022). Analisis Pengaruh Peningkatan Kadar Pb Terhadap Penggunaan Dosis Reagen melalui Flotasi Selektif. *Indonesian Mining and Energy Journal*, 5(1), 9–16.
- Wu, D., Ma, W., Mao, Y., Deng, J., & Wen, S. (2017). Enhanced sulfidation xanthate flotation of malachite using ammonium ions as activator. *Scientific Reports 2017 7:1*, 7(1), 1–9.
- Yang, B., Tong, X., Xie, X., & Huang, L. (2021). Insight into the effect of galvanic interactions between sulfide minerals on the floatability and surface characteristics of pyrite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(2), 24–33.
- Yang, B., Xie, X., Tong, X., & Huang, L. (2021). Influence of Terpenic Oil on Flotation Behavior of Sphalerite and Implication for the Selective Separation. *Adsorption Science & Technology*, 2021.
- Yuan, J., Li, S., Ding, Z., Li, J., Yu, A., Wen, S., & Bai, S. (2023). Treatment Technology and Research Progress of Residual Xanthate in Mineral Processing Wastewater. *Minerals*, 13(3).