

SKRIPSI

**STUDI BENEFISIASI BIJIH TEMBAGA SULFIDA
MENGUNAKAN METODE FLOTASI KOLOM**

Disusun dan diajukan oleh:

**SATRIAWAN UTOMO BUANA PUTRA
D111 20 1042**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

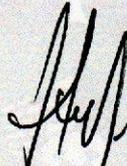
STUDI BENEFISIASI BIJIH TEMBAGA SULFIDA MENGUNAKAN METODE FLOTASI KOLOM

Disusun dan diajukan oleh

Satriawan Utomo Buana Putra
D111201042

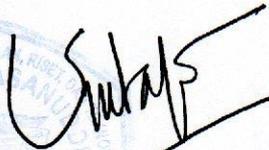
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 29 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,

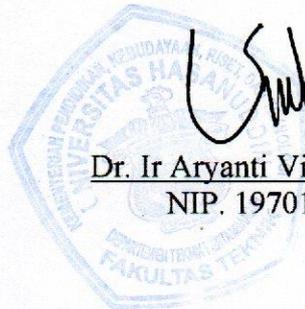


Dr. Ir Sufriadin, S.T., M.T.
NIP. 1966081720001210001

Ketua Program Studi,



Dr. Ir Aryanti Virianti Anas, S.T., M.T.
NIP. 197010052008012026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Satriawan Utomo Buana Putra
NIM : D111201042
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Studi Benefisiasi Bijih Tembaga Sulfida Menggunakan Metode Flotasi Kolom}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 29 November 2024

Yang Menyatakan



Satriawan Utomo Buana Putra

ABSTRAK

SATRIAWAN UTOMO BUANA PUTRA. *Studi Benefisiasi Bijih Tembaga Sulfida Menggunakan Metode Flotasi Kolom* (dibimbing oleh Sufriadin)

Benefisiasi bijih tembaga sulfida sangat perlu dilakukan untuk memisahkan mineral berharga dari pengotornya agar menghasilkan konsentrat yang memiliki nilai yang lebih ekonomis. Proses pemisahan ini menggunakan metode flotasi kolom dengan memanfaatkan perbedaan sifat hidrofobik pada permukaan mineral. Flotasi kolom dilakukan hanya pada tahapan *rougher* dengan menggunakan reagen berupa minyak pinus sebagai *frother* yang berfungsi untuk membentuk gelembung udara yang stabil, dan mengandung alkohol aromatik yang mana bersifat hidropobik serta *potassium ethyl xanthate* sebagai kolektor yang memiliki daya pengumpulan yang kuat namun dengan selektivitas yang sempurna terhadap mineral sulfida. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi mineralogi dan kimia bijih serta hasil flotasi kolom terhadap *recovery* konsentrat tembaga menggunakan metode flotasi kolom. Ukuran partikel yang digunakan yaitu -100 +150 mesh, -150 +200 mesh, dan -200 mesh. Waktu yang digunakan dalam proses flotasi yaitu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Karakterisasi mineralogi menggunakan analisis mikroskopis dan XRD menggunakan aplikasi *Match! 3* pada sampel bijih tembaga sulfida diperoleh kuarsa (SiO_2) sebesar 66,7%, muskovit ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{FOH})_2)$) sebesar 16,1%, biotit ($\text{K}(\text{MgFe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{FOH})_2$) sebesar 11,3%, klorit ($\text{H}_4\text{Mg}_3\text{O}_9\text{Si}_2$) sebesar 3,4%, dan kalkopirit (CuFeS_2) merupakan mineral pembawa tembaga sebesar 2,4%, dan pirit (FeS_2) 0,1%. Karakterisasi kimia menggunakan analisis AAS diperoleh kadar bijih tembaga -100 +150 mesh sebesar 0,08%, -150 +200 mesh 0,14%, dan -200 mesh 0,15%. Hasil percobaan menggunakan flotasi kolom menunjukkan kenaikan kadar tembaga dari 0,15% menjadi 0,16% pada ukuran partikel -100 +150 mesh dengan waktu flotasi 5 menit, sedangkan *recovery* tertinggi pada fraksi -200 mesh dengan waktu flotasi 15 menit sebesar 14,66%. Hal ini mengindikasikan bahwa ukuran partikel dan waktu yang digunakan mempengaruhi interaksi selektif antara gelembung udara dan partikel serta hasil perolehan pada proses flotasi kolom.

Kata Kunci: Tembaga, flotasi, kadar, ukuran partikel, waktu flotasi

ABSTRACT

SATRIAWAN UTOMO BUANA PUTRA. *Beneficiation Study of Copper Sulfide Ore Using Column Flotation Method* (supervised by Sufriadin)

Beneficiation of copper sulfide ores is necessary to separate valuable minerals from impurities to produce concentrates that have economic value. This separation process uses the column flotation method by utilizing differences in hydrophobic properties on the mineral surface. This column flotation is only carried out at the rougher stage using reagents in the form of pine oil as a frother which functions to form stable air bubbles, and contains aromatic alcohols which are hydrophobic and potassium ethyl xanthate as a collector which has strong collection power but with perfect selectivity to sulfide minerals. This study aims to determine the mineralogical and chemical composition of the ore and the results of column flotation on the recovery of copper concentrate using column flotation method. The grain size fractions used were -100 +150 mesh, -150 +200 mesh, and -200 mesh. The time used in the flotation process is 5 minutes, 10 minutes, and 15 minutes. Mineralogical characterization using microscopic and XRD analysis using Match! 3 on copper sulfide ore samples obtained quartz (SiO_2) by 66.7%, muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{FOH})_2)$) by 16.1%, biotite ($\text{K}(\text{MgFe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{FOH})_2$) by 11.3%, Chlorite ($\text{H}_4\text{Mg}_3\text{O}_9\text{Si}_2$) by 3.4%, and chalcopyrite (CuFeS_2) is a copper-bearing mineral by 2.4%, and pirit (FeS_2) 0.1%. Chemical characterization using AAS analysis obtained copper ore content -100 +150 mesh of 0.08%, -150 +200 mesh 0.14%, and -200 mesh 0.15%. Experimental results using column flotation showed an increase in copper content from 0.15% to 0.16% in the grain size fraction -100 +150 mesh with a flotation time of 5 minutes, while the highest recovery was in the -200 mesh fraction with a flotation time of 15 minutes at 14.66%. This indicates that the grain size fraction and time used affect the selective interaction between air bubbles and particles as well as the recovery in the column flotation process.

Keywords: Copper, flotation, grade, particle size, flotation time

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
KATA PENGANTAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Tembaga.....	6
2.2 Mineral Sulfida	12
2.3 Flotasi.....	15
2.4 Reagen-Reagen Flotasi	18
2.5 Analisis Mikroskop	23
2.6 Analisis XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	25
2.6 Analisis AAS (<i>Atomic Absorption Spectrophotometry</i>)	28
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Lokasi Pengambilan Sampel.....	30
3.2 Variabel Penelitian.....	31
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	31
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian.....	32
3.5 Analisis Data Penelitian	42
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1 Karakterisasi Sampel Tembaga Sulfida	46
4.2 Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Produk Hasil Flotasi Kolom.....	51
4.3 Pengaruh Ukuran Partikel Dan Waktu Flotasi Terhadap Kadar Konsentrat Tembaga Hasil Flotasi Kolom.....	56
4.4 Pengaruh Ukuran Partikel dan Waktu Flotasi Terhadap <i>Recovery</i> Tembaga.....	60
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Tembaga murni (Marshall dkk., 2004).....	6
Gambar 2 Mineral-mineral bijih sulfida dengan kilap logam (Panchuk, 2018)	14
Gambar 3 Sudut kontak antara mineral, air, dan udara (Zakiyuddin, 2009).....	15
Gambar 4 Selektif gelembung udara untuk partikel hidropobik (Permana, 2011).....	16
Gambar 5 Skema flotasi tembaga (schlesinger <i>et al.</i> , 2011).....	17
Gambar 6 Adsorpsi kolektor pada permukaan mineral (Permana, 2011).....	19
Gambar 7 Kolektor-kolektor sulfida (Castellon <i>et al.</i> , 2022)	19
Gambar 8 Klasifikasi kolektor (Castellon <i>et al.</i> , 2022)	20
Gambar 9 Mekanisme <i>frother</i> (Permana, 2011)	22
Gambar 10 Mekanisme interaksi antara permukaan mineral sulfida dan kolektor (Castellon <i>et al.</i> , 2022).....	23
Gambar 11 Mikroskop polarisasi (Gribble <i>and</i> Hall, 1985).....	25
Gambar 12 Metode difraksi sinar-X (Smallman <i>and</i> Bishop, 2000)	27
Gambar 13 Lokasi pengambilan sampel bijih tembaga sulfida	30
Gambar 14 Penggerusan sampel tembaga sulfida.....	34
Gambar 15 Pengayakan sampel bijih tembaga	34
Gambar 16 Alat ayakan yang digunakan	35
Gambar 17 Penimbangan sampel bijih tembaga.....	35
Gambar 18 Penamaan Sampel	36
Gambar 19 Proses memasukkan umpan dan reagen serta <i>conditioning</i>	37
Gambar 20 Proses flotasi dan produk flotasi	38
Gambar 21 Proses filtrasi dan pengeringan	38
Gambar 22 Analisis mikroskopis	39
Gambar 23 Analisis XRD	40
Gambar 24 Alat analisis AAS	41
Gambar 25 Diagram alir penelitian.....	45
Gambar 26 Kenampakan singkapan bijih tembaga sulfida.....	46
Gambar 27 Kenampakan mikroskopis tembaga sulfida yang menunjukkan mineral kalkopirit (Ccp), pirit (Py), Malasit (Mlc), Galena (Gn), muskovit (Ms), Sfalerit (Sp) dan kovelit (Cv)	47
Gambar 28 Hasil analisis XRD sampel awal bijih tembaga sulfida	48
Gambar 29 Pengaruh ukuran partikel terhadap persen massa dengan.....	54
Gambar 30 Pengaruh ukuran partikel terhadap persen massa dengan.....	55
Gambar 31 Pengaruh ukuran partikel terhadap persen massa dengan.....	56
Gambar 32 Pengaruh kadar konsentrat Cu hasil flotasi kolom terhadap ukuran partikel.....	58
Gambar 33 Pengaruh kadar konsentrat Cu hasil flotasi kolom terhadap waktu flotasi.....	60
Gambar 34 Pengaruh ukuran partikel terhadap <i>recovery</i> tembaga	62
Gambar 35 Pengaruh waktu flotasi terhadap <i>recovery</i> tembaga.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kelompok mineral penting berdasarkan komposisi kimianya	12
Tabel 2. Mineral umum sulfida.....	13
Tabel 3. Fasa mineral bijih tembaga sulfida	49
Tabel 4. Hasil analisis awal komposisi kimia bijih tembaga sulfida	51
Tabel 5. Produk hasil flotasi kolom berdasarkan ukuran partikel.....	52
Tabel 6. Persentase produk hasil flotasi kolom berdasarkan ukuran partikel	53
Tabel 7. Persentase kadar konsentrat Cu hasil flotasi kolom berdasarkan ukuran partikel	57
Tabel 8. Persentase kadar konsentrat Cu hasil flotasi kolom berdasarkan waktu flotasi.....	59
Tabel 9. Pengaruh ukuran partikel terhadap <i>recovery</i> tembaga.....	61
Tabel 10. Pengaruh waktu flotasi terhadap <i>recovery</i> tembaga	63

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
AAS	<i>Atomic Absorption Spectrophotometry</i>
Ccp	<i>Kalkopirit</i>
Ms	Muskovit
Mlc	Malasit
Gn	<i>Galena</i>
Sp	<i>Sphalerite</i>
Cv	Kovellit
Py	<i>Pirit</i>
Cu	<i>Cuprum</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Analisis XRD tembaga sulfida	70
Lampiran 2. Analisis mikroskop tembaga sulfida.....	74
Lampiran 3. Perhitungan <i>recovery</i>	75
Lampiran 4. Analisis AAS tembaga sulfida.....	77
Lampiran 5. Kartu Konsultasi Tugas Akhir	82

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *Subhanahu wa ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Studi Benefisiasi Bijih Tembaga Sulfida Menggunakan Metode Flotasi Kolom” dengan baik. Shalawat serta salam tidak lupa penulis haturkan kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'alaihi wasallam* yang telah menyampaikan petunjuk Allah *Subhanahu wa ta'ala* untuk kita semua.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang strata 1, Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, dimana dalam pelaksanaannya penulis telah mendapatkannya banyak ilmu dan pengalaman berharga. Dalam penulisan skripsi ini, penulis telah berusaha untuk menggambarkan dengan sebaik mungkin secara sistematis seluruh kegiatan dan hasil yang telah penulis lakukan selama menjalankan penelitian ini.

Dalam penelitian hingga penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih terkhusus kepada ayahanda Maderlung dan Ibunda Siti Hajar yang selalu memberikan motivasi, dukungan, rasa sayang dan doa dalam setiap sujudnya untuk kesuksesan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih dan rasa hormat sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Ir. Sufriadin, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian dan selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan saran selama penulisan skripsi ini. Berkat kesabaran dan keikhlasan beliau penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis juga berterima kasih kepada Ibu Ir. Rizki Amalia, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan dan saran yang membangun demi kesempurnaan skripsi ini.

Terima kasih juga penulis ucapkan kepada Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dan terima kasih kepada seluruh Bapak/Ibu dosen Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin yang telah memberikan pengetahuan yang sangat bermanfaat serta staff administrasi yang telah membantu dalam pengurusan keperluan dan berkas-berkas penulis selama berkuliah di Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada mahasiswi Universitas Muhammadiyah Makassar pemilik stanbuk 105401128720 yang telah menjadi sumber inspirasi dalam suka maupun duka, menjadi tempat penulis ketika merasa bimbang dan frustrasi, serta memberikan warna dan semangat dalam mengisi keseharian penulis selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini.

Terima kasih juga tidak lupa penulis ucapkan kepada Kak Muhammad Zahran Mubarak, S.T yang telah membantu penulis dalam melakukan analisis *X-Ray*

Diffraction (XRD) pada sampel bijih tembaga sulfida yang diteliti dan keluarga besar Mahasiswa Teknik Pertambangan Angkatan 2020 (DRILLING) yang selalu menemani, membantu, dan memotivasi penulis selama berkuliah di Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan kesempurnaan skripsi yang berkaitan selanjutnya.

Gowa, 29 November 2024

Satriawan Utomo Buana Putra

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tembaga (Cu) merupakan logam non-ferrous kedua yang paling banyak diproduksi setelah aluminium dan telah digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi karena sifat-sifat uniknya, seperti konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik, ketahanan korosi yang tinggi, serta kelenturan dan keuletannya yang luar biasa. Permintaan akan tembaga diperkirakan akan terus meningkat, karena tembaga dianggap sebagai salah satu dari 17 bahan atau logam penting yang diperlukan untuk mewujudkan masa depan rendah karbon (Bilal dkk., 2022).

Sulfida tembaga merupakan sumber utama tembaga metalik, yang mencakup 80% sumber daya tembaga. Bijih sulfida tembaga utama meliputi kalkopirit (CuFeS_2), bornit (Cu_5FeS_4), kovelit (CuS), dan kalkosit (Cu_2S). Konsentrat tembaga dari bijih sulfida biasanya diproduksi dengan flotasi dan kemudian diproses dengan metode pirometalurgi atau hidrometalurgi untuk mengekstraksi tembaga. Penelitian yang dilakukan ini menggunakan flotasi kolom untuk memisahkan mineral berharga dari pengotornya (Bilal dkk., 2022).

Flotasi kolom adalah metode sederhana yang banyak digunakan untuk memisahkan mineral berharga dari mineral pengotor berdasarkan sifat permukaan mineral tersebut. Dalam proses flotasi, partikel bijih yang telah dilakukan *conditioning* dengan air dalam sel flotasi dan dikondisikan dengan berbagai jenis reagen, seperti kolektor, *frother*, aktivator, depresan, dan pengatur pH, untuk mengatur tingkat hidrofobitas mineral berharga dan mineral pengotor. Kemudian, gelembung udara dimasukkan ke dalam *pulp* (campuran mineral dan air), sehingga partikel mineral tembaga yang bersifat hidrofobik menempel pada permukaan gelembung dan diambil sebagai konsentrat tembaga (Bilal dkk., 2022).

Penggunaan reagen kimia juga merupakan parameter penting dalam proses flotasi kolom. Hasil ini dikarenakan reagen kimia digunakan untuk menciptakan suatu kondisi agar proses flotasi berlangsung dengan baik. Setiap reagen kimia yang ditambahkan mempunyai fungsi yang spesifik. *Potassium Ethyl Xanthate* merupakan kolektor yang sering digunakan pada perusahaan emas dan tembaga.

Hal ini dikarenakan kolektor ini mudah larut dalam air dan terdisosiasi menjadi ion positif sebagai ion *potassium* dan ion negatif sebagai ion *ethyl xanthate* polar pada pulp. Penyerapan kimia dari ion *xanthate* kemudian terjadi kedalam permukaan mineral dan bisa menjadikan beberapa mineral menjadi hidrofobik. Kemampuan utama dari reagen ini adalah memiliki daya pengumpulan yang kuat namun dengan selektivitas yang sempurna terhadap mineral sulfida. Oleh karena itu, kolektor ini biasa digunakan pada mineral sulfida dan memberikan interaksi yang saling menguntungkan (Nugraha dan Muhammad, 2018). Sedangkan penggunaan *frother* berupa *pine oil* berfungsi untuk membentuk gelembung udara yang stabil, *pine oil* mengandung alkohol aromatik yang mana bersifat hidropobik (Wati dkk., 2022).

Dalam flotasi kolom, bijih dimasukkan di dekat bagian atas kolom, sementara udara disemprotkan dari bagian bawah, menciptakan zona udara yang dalam. Air pencuci ditambahkan dari atas untuk menghilangkan partikel halus yang terperangkap. Rangkaian flotasi menggunakan beberapa sel flotasi secara seri untuk memaksimalkan pemulihan mineral yang diinginkan. Rangkaian ini terdiri dari sel-sel yang disebut *rougher*, *cleaner*, dan *scavenger*. Sel flotasi *rougher*, yang umumnya bertipe mekanis, merupakan sel pertama dalam rangkaian dan bertujuan untuk meningkatkan pemulihan mineral berharga. Untuk mengurangi kehilangan mineral berharga dalam *tailing* akhir, *tailing* dari sel *rougher* diproses lebih lanjut di sel *scavenger*, sementara buih dari sel *rougher* digiling ulang untuk membebaskan mineral yang masih terjebak (*middling*). Produk yang dihasilkan kemudian dimasukkan ke dalam sel *cleaner* (Bilal dkk., 2022).

Keunggulan flotasi kolom ini meliputi biaya percobaan yang minimal, biaya pengoperasian yang rendah, dan kemampuan untuk menghasilkan konsentrat dengan mutu yang jauh lebih tinggi daripada sel konvensional. Meskipun sel kolom telah berhasil dalam instalasi industri, sel ini masih memiliki dua kelemahan yang melekat. Masalah pertama adalah partikel kasar memiliki kecepatan pengendapan yang tinggi, yang menyebabkan waktu tinggal yang lebih pendek di dalam sel, sehingga sulit untuk dipulihkan. Selain itu, partikel halus umumnya tidak memiliki cukup inersia untuk mengatasi garis arus di sekitar gelembung dan kecil kemungkinannya untuk bertabrakan dengan gelembung (Bilal dkk., 2022).

Metode flotasi telah diresmikan di tahun 1906 yang memiliki prinsip kerja berdasarkan perbedaan sifat permukaan mineral antara hidrofilik dan hidrofobik yang dibantu oleh reagen kimia. Tingkat keberhasilan flotasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, satu diantaranya berupa dosis reagen yang mana memiliki keterkaitan erat dengan kemampuan mineral agar dapat terapung per satuan waktu sehingga hal tersebut akan mempengaruhi hasil akhir flotasi (Wati dkk., 2022).

Dengan demikian, dilakukan penelitian yang berjudul Benefisiasi Bijih Tembaga Sulfida Menggunakan Metode Flotasi Kolom bertujuan untuk memahami pengaruh berbagai variabel dalam proses flotasi, seperti ukuran partikel, waktu flotasi, serta penggunaan *potassium ethyl xanthate* dan *pine oil* sebagai reagen kimia, sehingga dapat diketahui sejauh mana variabel-variabel tersebut mempengaruhi peningkatan kadar bijih tembaga sulfida. Selain itu, metode ini memiliki keuntungan berupa biaya instalasi dan biaya operasi yang rendah, namun mampu menghasilkan konsentrat bernilai ekonomis dan mempermudah proses ekstraksi tembaga melalui metode pirometalurgi atau hidrometalurgi dengan lebih efisien.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini antara lain :

1. Bagaimana karakteristik mineralogi dan kimia bijih tembaga sulfida?
2. Bagaimana pengaruh ukuran partikel dan waktu flotasi terhadap peningkatan kadar tembaga pada bijih sulfida?
3. Bagaimana perolehan (*recovery*) tembaga sulfida hasil flotasi kolom?

1.3 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian, Program Studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan kadar bijih sulfida melalui proses benefisiasi dengan metode flotasi kolom. Dalam penelitian ini, proses flotasi hanya dilakukan pada tahapan *rougher* saja. Adapun reagen flotasi yang digunakan berupa kolektor (*potassium ethyl xanthate*) dan *frother* (*pine oil*) dengan variasi ukuran partikel -100 +150 mesh, -150 +200 mesh, dan -200 mesh, serta waktu

flotasi 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Selain itu, proses *conditioning* dilakukan selama 10 menit untuk mengkondisikan permukaan partikel mineral sebelum flotasi, sehingga mineral berharga dapat menempel pada gelembung udara dan terangkat ke permukaan untuk diambil sebagai konsentrat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik mineralogi dan kimia bijih tembaga sulfida.
2. Menganalisis pengaruh ukuran partikel dan waktu flotasi terhadap peningkatan kadar tembaga pada bijih sulfida.
3. Menghitung tingkat *recovery* tembaga sulfida hasil flotasi kolom.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan yang komprehensif dalam memahami efektivitas pengolahan bijih tembaga sulfida, dengan fokus pada peningkatan perolehan konsentrat tembaga dari bijih serta menghasilkan konsentrat dengan kadar tembaga yang optimal. Hal ini penting untuk mempermudah proses ekstraksi tembaga melalui metode pirometalurgi atau hidrometalurgi, yang keduanya membutuhkan bahan baku dengan kualitas dan kadar yang sesuai untuk mencapai efisiensi maksimum dalam operasi ekstraksi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman mendalam mengenai parameter-parameter penting dalam pengolahan bijih tembaga sulfida, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi dan efektivitas dalam industri pertambangan dan pengolahan mineral.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tembaga

Indonesia memiliki kekayaan bahan tambang yang tersebar luas di darat maupun laut, menjadikannya salah satu negara dengan potensi tambang terbesar di dunia. Proses penambangan dan pengolahan bahan tambang ini memerlukan modal besar, tenaga ahli, serta teknologi canggih untuk memastikan efisiensi dan keberlanjutannya. Pemerintah berperan aktif dalam mendukung sektor pertambangan dengan mengumpulkan dan mengelola bahan tambang, baik dari dalam maupun luar negeri. Hasil tambang utama Indonesia mencakup minyak dan gas bumi, berbagai logam mineral seperti timah putih, tembaga, nikel, mangan, air raksa, besi, dan belerang, serta bahan organik seperti batubara dan batu-batu berharga. Salah satu logam yang menonjol adalah tembaga (Cu), yang dikenal karena kemampuan konduksi panas dan listriknya yang sangat baik, meskipun rentan terhadap korosi (Safitri dan Pratama, 2023). Tembaga murni memiliki tekstur halus, bersifat lunak, dan berwarna jingga kemerahan, yang merupakan ciri khas logam ini yang dapat dilihat pada Gambar 1 (Marshall dkk., 2004).



Gambar 1 Tembaga murni (Marshall dkk., 2004)

Tembaga (Cu) adalah unsur kimia dengan nomor atom 29 dan lambang Cu, yang berasal dari bahasa Latin *Cuprum*. Tembaga juga dikenal sebagai konduktor panas dan listrik yang sangat baik, serta memiliki sifat korosi yang relatif cepat. Dalam bentuk murninya, tembaga bersifat halus dan lunak, dengan warna permukaan yang khas, yaitu jingga kemerahan. Unsur ini dapat dipadukan dengan

timah untuk menghasilkan perunggu. Ion tembaga juga dapat larut dalam air, di mana pada konsentrasi tinggi, dapat berfungsi sebagai agen antibakteri dan bahan tambahan dalam pengawetan kayu. Meskipun tembaga dapat bersifat racun pada konsentrasi tinggi, dalam jumlah yang sedikit, unsur ini justru menjadi nutrisi esensial yang penting bagi kehidupan manusia dan organisme tingkat rendah (Sastramihardja, 2015).

Tembaga (Cu) berfungsi sebagai penghantar listrik yang sangat baik, yang dapat ditemukan pada bagian dalam kabel yang berwarna tembaga atau agak mengkilap. Tanpa keberadaan tembaga, penghantaran listrik untuk mengoperasikan berbagai peralatan sehari-hari akan sangat terganggu. Kabel listrik dilapisi dengan bahan isolator yang tidak menghantarkan listrik untuk mencegah risiko tersengat listrik saat disentuh. Oleh karena itu, sangat penting untuk tidak menyentuh kabel yang terbuka atau terkelupas karena dapat menimbulkan bahaya akibat tegangan listrik yang mengalir (Safitri dan Pratama, 2023).

Bijih tembaga yang paling sering ditemukan dan menjadi cadangan penting dunia meliputi kalkopirit (CuFe_2), bornit (Cu_5FeS_4), kovellit (CuS), dan kalkosit (Cu_2S). Selain itu, terdapat pula bijih tembaga lainnya seperti malasit $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, azurit ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), kuprit (Cu_2O), tenorit (CuO) yang, meskipun cadangannya tidak sebanyak jenis bijih utama, tetap dianggap ekonomis untuk diolah. Dalam rangka memenuhi permintaan industri terhadap tembaga dan mematuhi peraturan yang melarang penjualan tembaga dalam bentuk bijih mentah tanpa pengolahan, pengembangan teknologi pengolahan bijih tembaga menjadi sangat penting untuk dilakukan (Kusdarini dkk., 2023).

Deposit tembaga sulfida yang tersebar mendominasi produksi tembaga global. Perkiraan menunjukkan setidaknya 90% dari tembaga berasal dari deposit sulfida. Dari mineral sulfida, kalkopirit sejauh ini merupakan yang paling penting untuk sekitar setengah dari semua produksi tembaga. Deposit tembaga ditemukan di seluruh dunia dalam berbagai lingkungan geologis. Endapan hidrotermal paling signifikan dalam skala global, terdapat pula endapan magmatik dan supergen. Banyak jenis deposit mineral lainnya mengandung tembaga dalam jumlah yang bervariasi, namun hal ini memiliki kepentingan ekonomi yang sangat terbatas (Lusty dan Hannis, 2009).

2.1.1 *Porphyry Deposits*

Deposit tembaga porfiri saat ini merupakan sumber utama tembaga dunia (50-60% dari produksi dunia), molibdenum (99% dari produksi dunia) dan renium. Deposit tembaga porfiri juga merupakan sumber tembaga, perak dan timah yang signifikan dan berbagai produk sampingan logam. Endapan porfiri diasosiasikan dengan subduksi, felsik, intrusi batuan beku. Akibatnya mereka terjadi di daerah tumbukan batas lempeng seperti Cordillera Kanada, Pegunungan Andes dan di sekitar batas barat Cekungan Pasifik di Filipina, Indonesia dan Papua Nugini. Mineralisasi ini dikendalikan oleh rekahan, biasanya terdiri dari *stockwork* urat kuarsa dan breksi yang mengandung sulfida tembaga dengan tembaga dan/atau molibdenum. Mineralisasi dapat berkembang baik pada batuan intrusi maupun *hostrock*-nya, biasanya berasosiasi dengan inti alterasi yang keluar ke zona yang berbeda yang dicirikan oleh mineral alterasi sekunder lainnya. Mineralisasi dapat menempati beberapa km³ dan endapan biasanya mengandung ratusan juta ton bijih, meskipun ukurannya dapat berkisar dari puluhan juta hingga milyaran ton. Nilai tembaga umumnya berkisar dari 0,2 % hingga lebih dari 1 % (Lusty dan Hannis, 2009).

2.1.2 *Sediment-Hosted Deposits*

Deposit sedimen adalah sumber tembaga terpenting kedua di dunia yang menyumbang sekitar 20% dari produksi dunia. Mereka juga merupakan sumber penting timbal, seng dan perak dan sumber utama kobalt dunia, terutama dari Copperbelt Afrika Tengah. Endapan terdiri dari penyebaran sulfida berbutir halus di berbagai batuan sedimen kontinental termasuk serpih hitam, batupasir dan batugamping. Tonase endapannya bervariasi dengan rata-rata 22 juta ton dengan kadar 2,1% Cu dan 23 gr/ton Ag (Mosier *et. al.*, 1986).

2.1.3 *Red-Bed Copper Deposits*

Terdapat dua jenis endapan *red-bed deposits* yaitu vulkanik dan sedimen. Endapan vulkanik terjadi pada aliran lava terestrial mafik dan batuan sedimen vulkanik klastik terkait dengan sulfida yang disebarkan melalui *hostrock* permeabel atau rongga pengisi. Endapan sedimen terbentuk dalam sedimen kontinental merah yang diendapkan di lingkungan pengoksidasi dan terdiri dari sulfida yang diendapkan dalam lapisan permeabel di *hostrock*. Diperkirakan bahwa tembaga diendapkan

dalam endapan ini ketika cairan kaya oksigen naik melalui zona permeabel dan menemukan bahan yang tereduksi seperti bahan organik dan pirit. Tonase berkisar dari ratusan ribu hingga ratusan juta ton, biasanya dengan kadar sekitar 1 % hingga 4 % tembaga (Lusty dan Hannis, 2009).

2.1.4 Volcanogenic Massive Sulphide (VMS) Deposits

Deposit VMS merupakan sumber penting tembaga dan banyak logam lainnya karena distribusinya yang luas, tonase yang substansial (0,1–500 juta ton) dan kadar yang relatif tinggi. Logam mulia, termasuk perak dan tembaga, adalah produk sampingan yang umum. Endapan ini terbentuk dari spektrum proses vulkanik dan hidrotermal, mencakup komposisi kimia yang luas, terjadi dalam berbagai pengaturan tektonik, dan biasanya menunjukkan kontras yang mencolok dalam karakteristik fisik antara tubuh bijih dan *hostrock*-nya. Endapan sulfida masif volkanogenik diperkaya dengan Cu, Pb, Zn, Au, dan Ag. Sekitar 1-100 deposit VMS telah diidentifikasi di seluruh dunia dengan perkiraan total sumber daya sekitar 10 miliar ton. Deposit VMS dapat dibagi menjadi tiga kategori utama berdasarkan mineraloginya yaitu jenis Kuroko, Besshi dan Siprus. Deposito sangat bervariasi dalam ukuran tetapi umumnya kadar tinggi dan tonase rendah (Mosier *et. al.*, 2009).

2.1.5 Magmatic Sulphide Deposits

Magmatic sulphide deposits merupakan kumpulan beragam endapan yang mengandung tembaga yang berasosiasi dengan nikel dan *Platinum-Group Elements* (PGE) yang terjadi karena konsentrasi sulfida di dalam batuan mafik dan ultrabasa. Saat magma naik melalui kerak itu mendingin dan, jika kandungan belerang dari magma cukup, fase sulfida cair yang terpisah dapat berkembang (tetesan cairan sulfida dalam cairan silikat). Unsur-unsur seperti nikel, tembaga, PGE dan besi secara istimewa berpindah ke fase sulfida dari magma sekitarnya. Cairan sulfida yang kaya logam cenderung tenggelam karena kepadatannya yang lebih besar, membentuk konsentrasi sulfida di lantai dapur magma. Deposit di seluruh dunia biasanya memiliki kadar antara 0,2 dan 2% Cu dengan tonase bijih mulai dari beberapa ratus ribu hingga puluhan juta ton. Endapan magmatik sulfida nikel-

tembaga terbesar berumur Archean (4000–2500 juta tahun) dan Proterozoikum (2500–540 juta tahun) (Lusty dan Hannis, 2009).

Berdasarkan produksi logam utamanya, endapan sulfida magmatik dalam batuan mafik dapat dibagi menjadi dua jenis utama yang kaya sulfida, biasanya dengan 10 % hingga 90 % mineral sulfida, dan memiliki nilai ekonomi terutama karena kandungan Ni dan Cu-nya, dan yang miskin sulfida, biasanya dengan 0,5 % hingga 5 % mineral sulfida, dan dieksploitasi terutama untuk PGE (Lusty dan Hannis, 2009).

2.1.6 *Sedimentary Exhalative Deposits (SEDEX)*

Deposit ini merupakan sumber dari timbal, seng dan perak. Tetapi untuk tembaga hanya merupakan produk sampingan dalam beberapa deposit. SEDEX adalah endapan yang terbentuk oleh ekshalasi air asin ke dalam air laut atau sedimen dasar laut, menyebabkan pengendapan kimiawi mineral saat air asin mendingin. Endapan SEDEX menunjukkan banyak kesamaan dengan endapan VMS, kecuali kurangnya asosiasi vulkanik yang dekat. Endapan biasanya diwakili oleh lembaran atau lensa tabular yang terdiri dari pita sulfida berbutir halus yang diselingi dengan batuan serpih, lanau, dan *hostrock* karbonat. Badan sulfida umumnya hanya berukuran beberapa meter tetapi dapat memanjang secara lateral lebih dari satu kilometer. Rata-rata tonase untuk deposit global adalah 15 juta ton dengan kadar 5,6% Zn, 2,8% Pb dan 30 g/t Ag. Deposit endapan ini diperkirakan hanya mengandung 1% tembaga. (Briskey, 1986).

2.1.7 *Epithermal Deposits*

Endapan epitermal merupakan endapan penting untuk produksi tembaganya dan juga mengandung logam lain seperti perak, tembaga, dan logam lainnya. Endapan diasosiasikan dengan lingkungan terkait subduksi pada batas lempeng. Endapan ini dapat berbentuk urat, *stockworks* atau breksi dan umumnya berumur Tersier (63–2 juta tahun) hingga Kuartar (2 juta tahun hingga sekarang). Endapan ini biasanya terbentuk pada zona kerak dangkal (300-600 m) oleh sirkulasi cairan magmatik melalui batuan vulkanik. Mineral bijih utama termasuk kalkosit, kovellit, bornit dan tembaga nativ dengan sejumlah kecil kalkopirit. (Panteleyev, 1996).

2.1.8 Skarn Deposits

Endapan skarn adalah salah satu jenis bijih yang melimpah di kerak bumi dan terbentuk dalam batuan hampir semua umur. Endapan skarn biasanya dibentuk oleh interaksi *hostrock* pembawa karbonat dan cairan hidrotermal magmatik. Untuk tujuh jenis skarn utama Fe, Au, Cu, Zn, W, Mo, dan Sn merupakan sumber penting penghasil Fe, Cu, Pb, Zn, dan Au. Dibandingkan dengan skarn Fe-Cu proksimal, skarn Pb-Zn terbentuk pada jarak yang relatif jauh dari batuan magmatik, sehingga terbentuk di lingkungan suhu yang lebih rendah (Meinert *et al.*, 2005).

Endapan skarn berbentuk sangat bervariasi dari lensa tabular hingga pipa vertikal dengan zona bijih tidak beraturan yang dikendalikan oleh kontak intrusif. Skarn tembaga terbesar dikaitkan dengan endapan tembaga porfiri. Mineralisasi tembaga hadir sebagai *stockwork veining* dan diseminasi baik di batuan intrusi maupun di sekitarnya. Kalkopirit cenderung menjadi mineral tembaga yang dominan, terjadi dengan bornit dan tennanit. Secara global, skarn tembaga rata-rata 1 % hingga 2 % tembaga, umumnya berkisar antara satu hingga seratus juta ton, meskipun beberapa deposit biasa melebihi 300 juta ton (Lusty dan Hannis, 2009).

2.1.9 Vein Deposits

Endapan urat tembaga mencakup berbagai jenis endapan dimana tembaga adalah logam dominan. Endapan tersebut dikontrol secara struktural dan terjadi pada sesar, sistem sesar, dan zona urat-breksi atau zona penggantian di batuan inang terkait juga ada. Endapan ini sangat bervariasi dalam ukuran dan kelas. Endapan urat adalah struktur termineralisasi yang biasanya berkembang bersama dengan rekahan dan ketebalannya bervariasi dari sentimeter hingga puluhan meter atau lebih. Sulfida umumnya didistribusikan secara tidak teratur dan diseminasi dalam kuarsa, karbonat dan mineral pengotor lainnya (Lusty dan Hannis, 2009).

Pentingnya endapan urat terus berkurang seiring dengan perubahan ekonomi dan teknik ekstraksi yang lebih baik yang telah memungkinkan endapan besar dan kadar rendah untuk ditambang. Tembaga umumnya terdapat dalam urat yang terkait dengan kuarsa, perak, tembaga dan kadang-kadang uranium, antimon, dan fosfor. Vena polimetalik ini mungkin terkait dengan tembaga porfiri, skarn tembaga, tembaga-perak-tembaga epitermal dan endapan tembaga yang diinangi sedimen (Lusty dan Hannis, 2009).

2.1.10 Supergene Deposits

Alterasi supergen adalah pengayaan sekunder insitu dari deposit dimana mineral bijih primer dioksidasi, dilarutkan, dan dipresipitasi kembali, terjadi umumnya di permukaan air. Pengayaan supergen terjadi di atas bijih hipogen primer dan dapat meluas secara lateral dan vertikal (mencapai puluhan meter ke bawah).

Selimut pengayaan mineral yang mengandung mineral tembaga berkualitas tinggi, seperti kalkosit, kovelit, dan bornit, dapat meningkatkan kadar rata-rata bijih menjadi 1 % hingga 3 % tembaga. Pengayaan supergen mendukung batuan yang permeabel terhadap air meteorik dan mengandung pirit yang melimpah untuk memungkinkan pembentukan asam sebagai pengoksidasi. Kehadiran mineral pembawa logam yang larut dalam asam juga dapat berkontribusi pada pembentukan deposit supergen. Pengayaan supergen telah menjadi faktor utama dalam pengembangan beberapa deposit tembaga porfiri (Lusty dan Hannis, 2009).

2.2 Mineral Sulfida

Mineral sulfida adalah kelompok mineral yang secara kimiawi umumnya mengandung sulfida (S^{2-}) sebagai anion utama yang berikatan dengan kation logam atau semilogam, seperti besi (Fe), seng (Zn), tembaga (Cu), timbal (Pb), antimon (Sb), atau arsenik (As). Mineral-mineral ini biasanya memiliki ciri fisik berupa kilap logam, warna gelap, dan terbentuk melalui proses pembekuan magma pada batuan beku. Keberadaan mineral sulfida jelas sangat penting dari segi ekonomi dikarenakan beberapa jenisnya merupakan sumber utama bijih mineral logam, seperti tembaga, seng, timbal, antimon, molibdenum, kobalt, nikel, dan perak, yang sering dieksplorasi dan dieksploitasi untuk berbagai keperluan industri. Berdasarkan penjelasan mengenai sumber utama mineral penting dalam keperluan industri, maka dikelompokkan sesuai komposisi kimianya (Tabel 1).

Tabel 1. Kelompok mineral penting berdasarkan komposisi kimianya

Kelompok	Contoh Mineral
<i>Native elements</i>	Grafit, intan, tembaga, Sulfur
Sulfida	<i>Pirit, kalkopirit, pirhotit</i>
Oksida dan hidroksida	Korundum, magnetit, hematit, rutil, spinel, diaspor

Kelompok	Contoh Mineral
Karbonat	Aragonit, kalsit, dolomit, siderit
Halida	Halit, silvit
Sulfat	Gypsum, anhidrit, barit
Fosfat	Apatit, fosforit
Silikat	Nesosilikat, sorosilikat, siklosilikat, inosilikat, filosilikat, tektosilikat

Sumber: Haldar & Tisljar (2014)

Sebagian mineral sulfida mungkin tidak termasuk dalam kategori mineral bijih yang memiliki nilai ekonomi tinggi, namun keberadaan mereka sering kali menjadi indikator penting dalam proses eksplorasi dan penambangan sumber daya mineral. Mineral sulfida dapat berasosiasi dengan mineral-mineral lain yang lebih berharga secara ekonomi, sehingga kehadiran mereka dapat memberikan petunjuk tentang potensi keterdapatan endapan bijih bernilai tinggi di suatu wilayah. Selain itu, mineral sulfida juga menyediakan informasi penting mengenai kondisi geologi suatu daerah, yang membantu dalam penilaian potensi geologi dan identifikasi endapan mineral bernilai. Beberapa contoh umum dari mineral sulfida dapat dilihat pada Tabel 2 (Winarno dan Marin, 2020).

Tabel 2. Mineral umum sulfida

Nama Mineral	Rumus Kimia	Penggunaan
<i>Galena</i>	PbS	Bijih timbal
<i>Sphalerite</i>	ZnS	Bijih seng
Sinabar	HgS	Bijih merkuri
Kovellit	CuS	Bijih tembaga
Realgar	AsS	Bijih arsen
Orpimen	As ₂ S ₃	Bijih arsen
Stibnit	Sb ₂ S ₃	Bijih antimon
Molibdenit	MoS ₂	Bijih molibdenum
<i>Kalkopirit</i>	CuFeS ₂	Bijih tembaga
Bornit	Cu ₃ FeS ₄	Bijih tembaga

Sumber: Nesse (2020)

Secara umum, mineral-mineral sulfida memiliki beberapa karakteristik yang membedakannya dari jenis mineral lain. Sifat utama mineral sulfida adalah opak, memiliki berat jenis yang tinggi, serta kilap logam yang khas. Tingkat kekerasan

mineral-mineral ini bervariasi dari lunak hingga sedang, dengan warna goresan yang umumnya hitam. Meskipun demikian, terdapat pengecualian pada beberapa mineral sulfida tertentu yang memiliki warna terang dan bersifat tembus cahaya, seperti realgar, sinabar, dan *orpiment*, yang berbeda dari kebanyakan mineral sulfida lainnya yang cenderung gelap dan buram (Winarno dan Marin, 2020).

Salah satu contoh mineral sulfida yang menarik perhatian adalah *pirit*, yang sering kali disebut sebagai "*fool's gold*" karena kemiripannya dengan tembaga. *Pirit* memiliki bentuk kristal kubik yang teratur dan berwarna kuning ketembagaan, namun warna ini lebih pucat dibandingkan dengan tembaga asli. Meskipun tampak serupa dengan tembaga, *pirit* tidak memiliki nilai ekonomis yang signifikan sebagai sumber bijih besi, karena kandungan sulfida yang tinggi membuatnya tidak cocok untuk digunakan sebagai sumber logam. Oleh karena itu, *pirit* lebih sering dianggap sebagai mineral penanda daripada mineral yang bisa dimanfaatkan secara ekonomis (Winarno dan Marin, 2020).

Sebagian besar mineral sulfida terbentuk di lingkungan batuan beku, terutama melalui proses pembekuan magma dan aktivitas hidrotermal yang menghasilkan kondisi ideal untuk pembentukan mineral-mineral ini. Aktivitas hidrotermal sering menghasilkan endapan sulfida yang berasosiasi dengan logam-logam berharga seperti tembaga, timbal, dan seng. Contoh-contoh mineral sulfida dapat dilihat pada Gambar 2 yang menunjukkan berbagai variasi mineral sulfida yang terbentuk di lingkungan geologi tersebut (Winarno dan Marin, 2020).

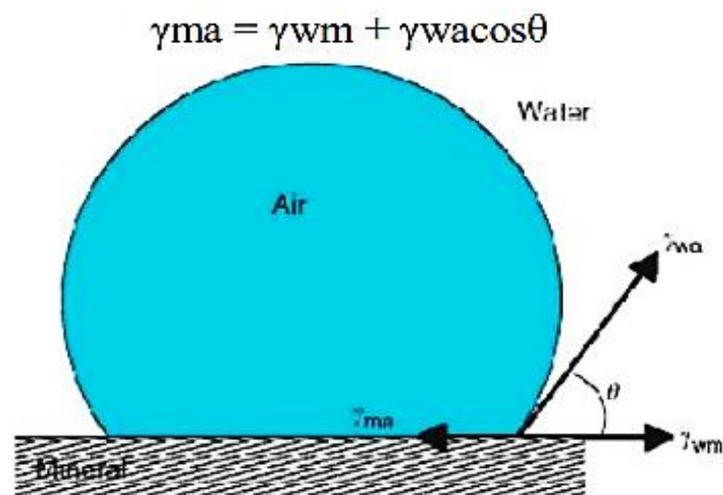


Gambar 2 Mineral-mineral bijih sulfida dengan kilap logam (Panchuk, 2018)

2.3 Flotasi

Flotasi adalah salah satu metode pemisahan mineral berharga dari mineral pengotor yang memanfaatkan perbedaan sifat hidrofobisitas di antara keduanya. Sifat hidrofobisitas mineral berharga dan mineral pengganggu dapat dioptimalkan dengan penambahan surfaktan, yang meningkatkan perbedaan hidrofobisitas di antara partikel-partikel tersebut. Proses ini memungkinkan pemisahan mineral secara selektif, sehingga mempermudah ekstraksi mineral logam yang kompleks. Flotasi sering digunakan dalam pemisahan bijih sulfida, karbonat, dan oksida sebagai langkah awal dalam proses pemurnian lebih lanjut. Pada proses ini, partikel yang bersifat hidrofilik akan tetap berada di dalam larutan, sedangkan perbedaan massa jenis antara gelembung udara dan air menyebabkan partikel yang bersifat hidrofobik naik ke permukaan, memungkinkan pemisahan yang efektif (Zakiyuddin, 2009).

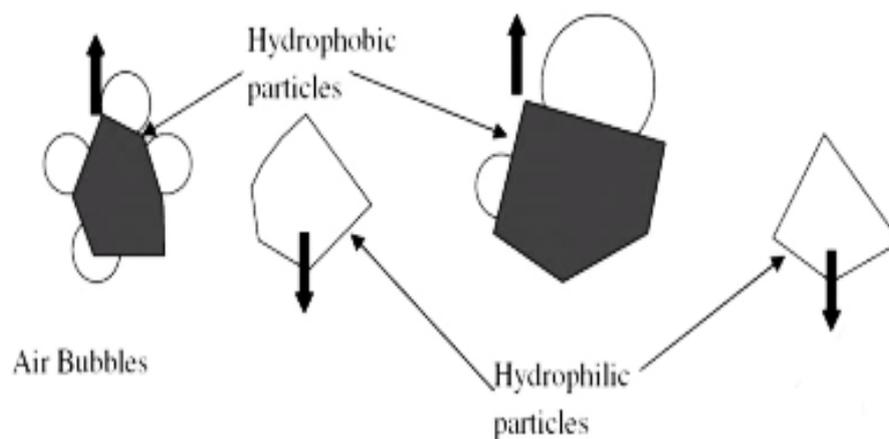
Flotasi melibatkan tiga fase utama, yaitu padat, cair, dan gas, serta interaksi kompleks di antara ketiga fase tersebut, seperti interaksi padat-cair, padat-gas, cair-gas, dan padat-cair-gas. Karakteristik partikel yang bersifat hidrofobik atau hidrofilik ditentukan oleh keterbasahan (*wettability*) fase padat dalam interaksi antara fase padat, cair, dan gas. Parameter yang mempengaruhi keterbasahan ini adalah sudut kontak, yang menggambarkan interaksi antara ketiga fase tersebut. Sudut kontak (θ), yang ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini, berkaitan erat dengan tegangan permukaan antara fase padat, cair, dan gas (Zakiyuddin, 2009).



Gambar 3 Sudut kontak antara mineral, air, dan udara (Zakiyuddin, 2009)

Partikel yang memiliki permukaan kasar dengan luas permukaan relatif kecil dan ukuran lebih kecil daripada gelembung gas (*diffuser*) akan cenderung menempel pada gelembung gas tersebut, sehingga terangkat ke permukaan. Sebaliknya, partikel dengan ukuran yang lebih besar akan terjebak di dalam pori-pori bahan pengikat (*bonding agent*) yang kemudian terdorong oleh gelembung gas, menyebabkan partikel-partikel tersebut ikut mengapung. Sementara itu, partikel dengan permukaan halus akan tetap terlarut dalam air dan tidak akan mengapung. Oleh karena itu, pemisahan partikel dalam suatu campuran fasa cair dapat dilakukan dengan menggunakan metode flotasi, di mana partikel dengan karakteristik yang berbeda akan berperilaku berbeda ketika di dalam media cair dan gelembung gas.

Reagen merupakan bagian yang sangat penting dalam proses flotasi, karena efektivitas proses flotasi sangat bergantung pada jenis dan komposisi reagen yang digunakan, yang dapat bervariasi tergantung pada jenis mineral yang ingin diperoleh. Penggunaan reagen flotasi menciptakan skema termodinamika yang memungkinkan terjadinya interaksi selektif antara gelembung udara, partikel hidrofobik, dan partikel hidrofilik. Skema ini, yang ditampilkan pada Gambar 4 di bawah, menunjukkan bagaimana gelembung udara secara selektif menempel pada partikel hidrofobik dan kemudian mengangkatnya ke permukaan, sementara partikel hidrofilik tetap berada di dalam *slurry* (Permana, 2011).

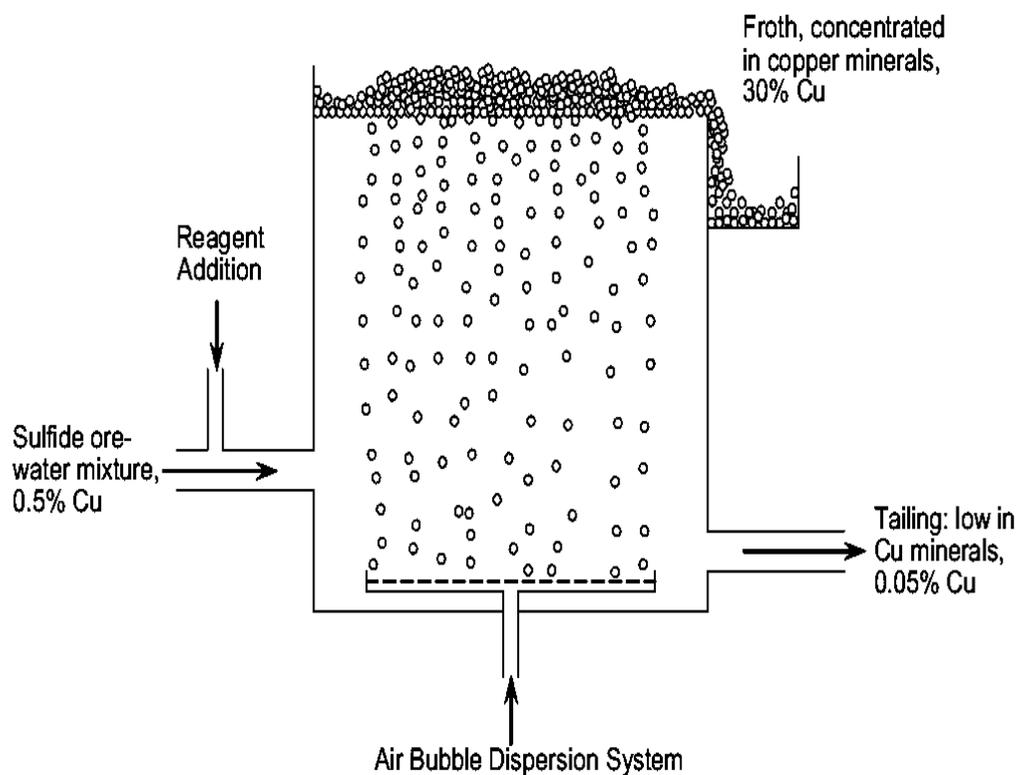


Gambar 4 Selektif gelembung udara untuk partikel hidropobik (Permana, 2011)

Dalam proses konsentrasi flotasi, penambahan reagen ke dalam campuran air dan mineral (*pulp*) memainkan peran krusial dalam mengubah sifat permukaan partikel mineral. Sebagian besar mineral bersifat hidrofilik (suka air), sehingga

diperlukan perubahan sifat permukaan menjadi hidrofobik (menolak air) untuk meningkatkan efektivitas flotasi. *Frother* merupakan salah satu reagen penting yang digunakan dalam proses ini berfungsi untuk menstabilkan gelembung udara dengan menurunkan tegangan permukaan air, serta mengontrol karakteristik buih yang dihasilkan selama flotasi. *Frother* mengetahui bahwa gelembung udara tetap stabil dan tidak pecah, yang esensial untuk proses flotasi mineral (Will and Munn, 2006).

Selain *frother*, kolektor juga memiliki peran yang sangat penting dalam flotasi. Kolektor bekerja dengan cara melapisi mineral tertentu secara selektif, menjadikannya hidrofobik dengan menyerap ion atau molekul pada permukaan mineral. Proses ini mengurangi kestabilan lapisan hidrat yang memisahkan permukaan mineral dari gelembung udara, sehingga memungkinkan mineral untuk menempel pada gelembung udara dan terangkat ke permukaan. Modifikasi sifat permukaan mineral ini sangat penting untuk memisahkan mineral berharga dari mineral pengotor secara efektif. Skema flotasi tembaga dapat dilihat pada Gambar 4 (Will and Munn, 2006).



Gambar 5 Skema flotasi tembaga (schlesinger *et al.*, 2011)

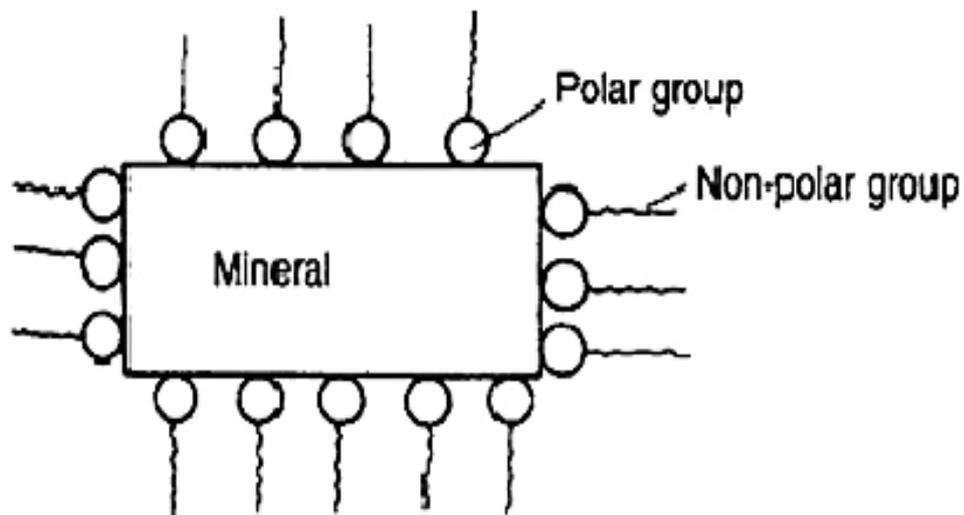
2.4 Reagen-Reagen Flotasi

Reagen merupakan komponen yang sangat krusial dalam proses flotasi, karena pemilihan reagen yang tepat sangat menentukan efektivitas pemisahan dan konsentrasi mineral. Oleh karena itu, dalam industri, kontrol terhadap penambahan reagen menjadi aspek yang paling vital dalam proses flotasi. Reagen flotasi dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama berdasarkan fungsinya, yaitu kolektor, *frother*, dan *modifier*. Masing-masing kategori reagen ini memiliki kegunaan spesifik dan sering kali saling melengkapi untuk mencapai hasil flotasi yang optimal (Permana, 2011).

Kolektor bertugas untuk meningkatkan afinitas mineral berharga terhadap gelembung udara, *frother* berfungsi untuk menghasilkan gelembung udara yang stabil dan meningkatkan volume busa, sedangkan *modifier* digunakan untuk mengatur kondisi pH dan mengontrol reaksi kimia lainnya dalam *slurry*. Kombinasi yang tepat dari ketiga jenis reagen ini, dapat menghasilkan konsentrat mineral dengan kualitas yang diinginkan (Permana, 2011):

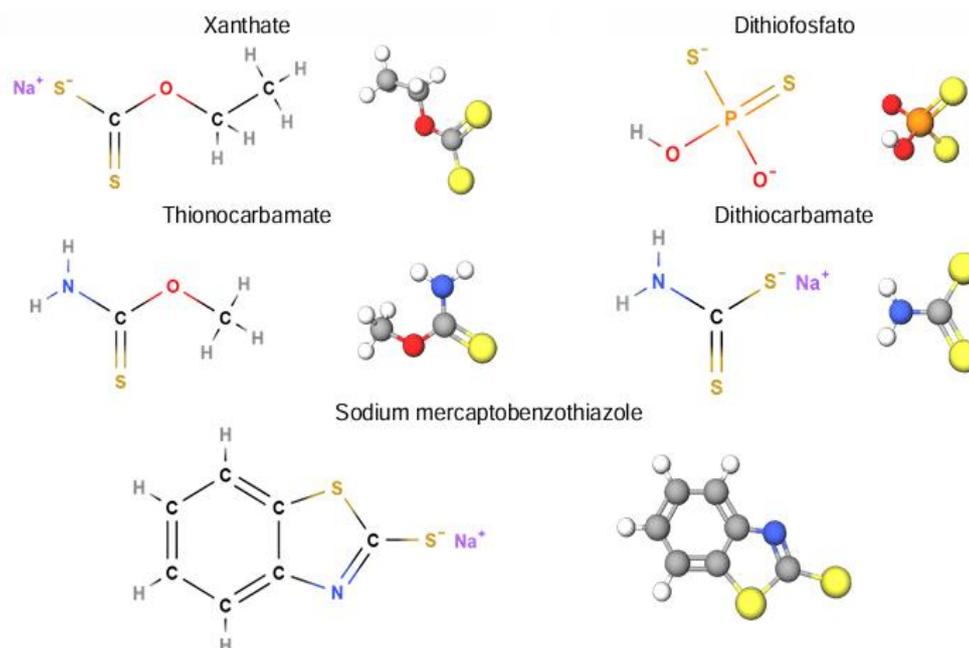
2.4.1 Kolektor

Kolektor adalah substansi yang secara selektif melapisi mineral-mineral tertentu, menjadikannya hidrofobik (menolak air) dengan cara menyerap ion atau molekul pada permukaan mineral tersebut. Proses ini mengurangi kestabilan lapisan hidrat yang memisahkan permukaan mineral dari gelembung udara, sehingga memungkinkan partikel mineral menempel pada gelembung udara. Ketika kolektor ditambahkan ke dalam larutan, terjadi penyerapan kimia atau pembentukan ikatan ion antara gugus polar dari kolektor dengan ion atau mineral pada permukaan mineral. Gugus non-polar dari kolektor kemudian mengelilingi partikel mineral, menciptakan sifat hidrofobik yang memungkinkan mineral tersebut menempel pada gelembung udara. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah ini, kolektor membentuk lapisan tipis yang bersifat hidrofobik pada permukaan mineral (Permana, 2011).



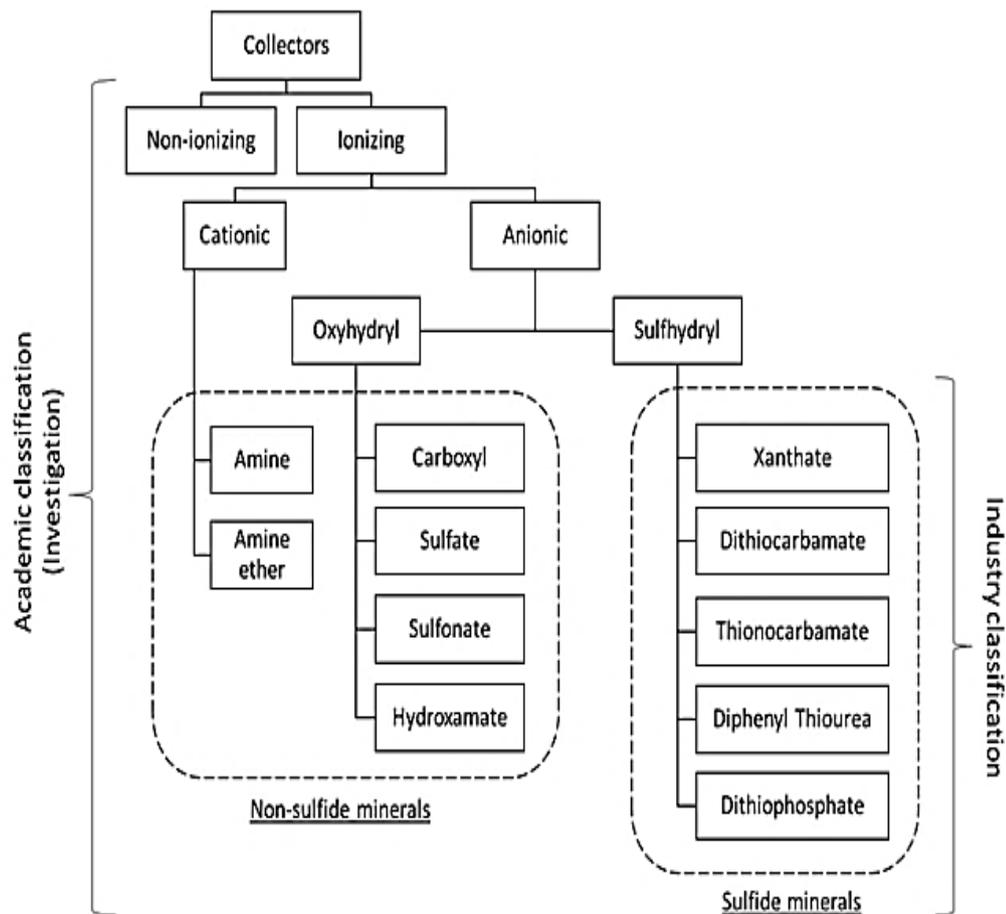
Gambar 6 Adsorpsi kolektor pada permukaan mineral (Permana, 2011)

Dalam proses flotasi bijih tembaga, *xanthate* merupakan kolektor utama yang paling sering digunakan, sedangkan *dithiophosphate* dan kolektor lainnya digunakan dalam jumlah yang lebih terbatas. Fungsi utama dari kolektor-kolektor ini adalah untuk memisahkan mineral berharga dari bijih dengan cara meningkatkan afinitas permukaan mineral terhadap gelembung udara dalam sel flotasi, sehingga mineral-mineral tersebut dapat mengapung dan terpisah dari gangue atau bahan tidak berharga lainnya. Kolektor-kolektor sulfida dapat lihat pada Gambar 7 dibawah ini.



Gambar 7 Kolektor-kolektor sulfida (Castellon *et al.*, 2022)

Berdasarkan sifat kimianya, kolektor-kolektor ini dapat dibagi menjadi dua kelompok utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, yaitu kolektor anionik dan kolektor kationik. Kedua kelompok ini memiliki mekanisme kerja dan aplikasi yang berbeda dalam proses flotasi. (Bulatovic, 2007).



Gambar 8 Klasifikasi kolektor (Castellon *et al.*, 2022)

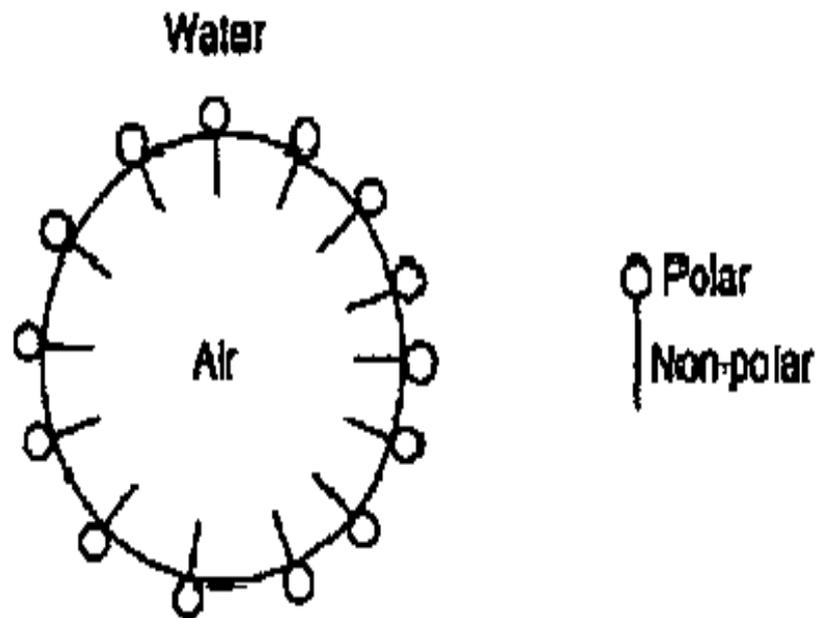
Kolektor anionik dapat dibedakan berdasarkan struktur formulanya menjadi kolektor oksihidril (*oxyhydril collector*) dan kolektor sulfhidril (*sulphydryl collector*). Pada kolektor oksihidril, asam organik dan asam sulfo (*sulpho-acid*) berfungsi sebagai gugus polar. Hidrogen dari asam (atau logam ekuivalen) terhubung dengan rantai hidrokarbon melalui satu atom oksigen. Contoh kolektor oksihidril meliputi karboksilat (asam lemak), sulfat, dan sulfonat. Karboksilat merupakan salah satu jenis kolektor oksihidril yang banyak digunakan di industri, dengan anggota yang mencakup asam oleat, sodium oleat, asam lemak sintetis, dan minyak tall (Bulatovic, 2007).

Jenis kolektor anionik lainnya adalah *sulphydryl collector*, yang merupakan jenis kolektor paling banyak digunakan dalam proses flotasi. Kolektor ini memiliki grup polar yang mengandung belerang bervalensi dua (*thio compound*) dan hidrogen asam (atau logam yang setara), yang dihubungkan melalui atom belerang bervalensi dua. *Sulphydryl collector* dikenal karena kekuatannya yang tinggi dan selektivitasnya dalam memisahkan mineral-mineral sulfida. Jenis kolektor *thiol* yang paling umum digunakan adalah *xanthogenates*, yang secara teknis dikenal sebagai *xanthates*, serta *dithiophosphates*. *Xanthates* merupakan salah satu jenis kolektor yang sangat penting dalam proses benefisiasi menggunakan metode flotasi mineral sulfida (Wills and Munn, 2006).

2.4.2 Frother

Frother adalah senyawa yang berfungsi untuk menurunkan tegangan permukaan gelembung, sehingga mampu menghasilkan dan menstabilkan gelembung agar tidak mudah pecah. Setelah permukaan partikel mineral menjadi hidrofobik, partikel tersebut harus dapat menempel pada gelembung udara yang diinjeksikan melalui proses aerasi. Namun, seringkali timbul masalah ketika gelembung-gelembung tersebut menjadi tidak stabil dan mudah pecah akibat benturan dengan partikel padat, dinding sel flotasi, atau gelembung-gelembung lain. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan penambahan bahan ke dalam *slurry* yang dapat menstabilkan gelembung udara. Bahan tambahan yang berfungsi sebagai penstabil gelembung ini dikenal dengan nama *frother* (Permana, 2011).

Bahan organik yang larut dalam air cenderung menurunkan tegangan permukaan, sedangkan bahan anorganik justru meningkatkan tegangan permukaan. Adsorpsi pada zat organik dikenal sebagai adsorpsi positif, sementara pada zat anorganik disebut adsorpsi negatif. Meskipun beberapa zat anorganik dapat menyebabkan pembentukan busa, reagen yang efektif untuk *frother* umumnya adalah zat organik. *Frother* merupakan zat organik dengan struktur heteropolar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, di mana bagian polar adalah gugus yang bersifat hidrofilik (suka air) dan bagian non-polar (hidrokarbon) adalah gugus yang bersifat hidrofobik (menolak air). *Frother* harus memiliki kelarutan dalam air yang memadai, karena jika tidak larut, *frother* tidak akan tersebar merata dalam larutan, sehingga mengurangi efektivitasnya dalam proses flotasi (Permana, 2011).



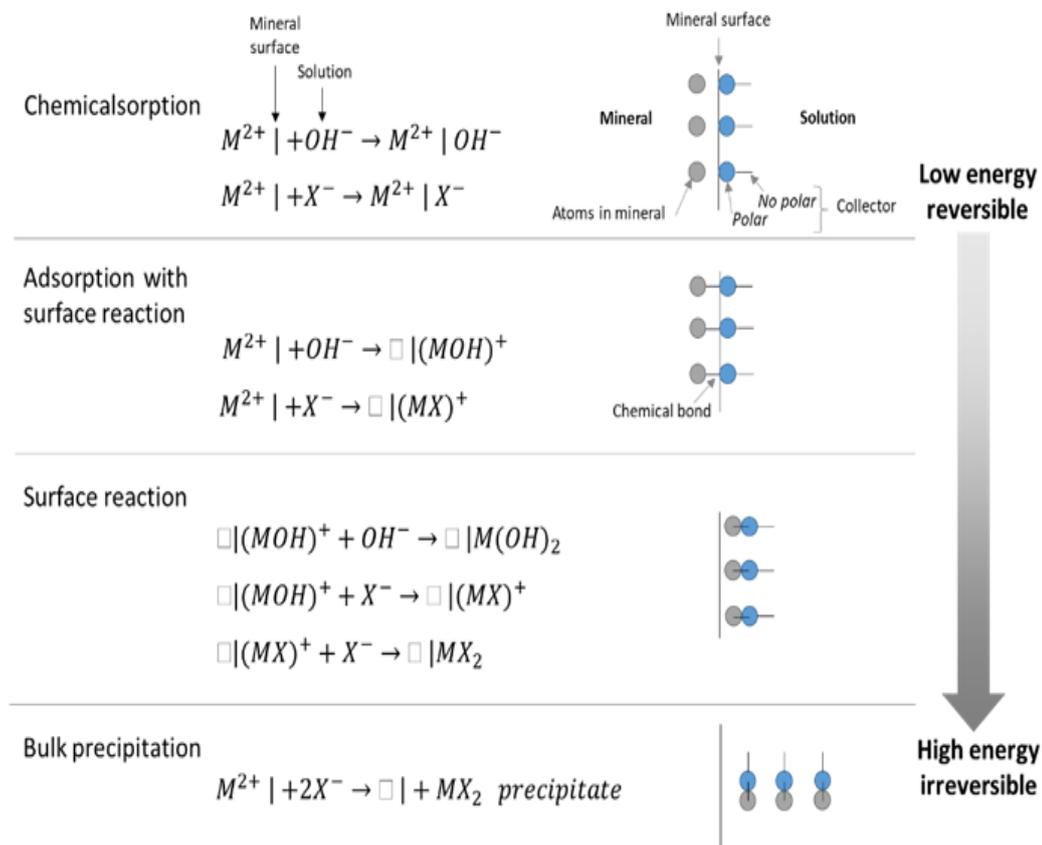
Gambar 9 Mekanisme *frother* (Permana, 2011)

2.4.3 Modifier

Reagen pengubah, yang umumnya dikenal sebagai regulator, adalah bahan kimia penting dalam pengolahan mineral yang berfungsi mengontrol interaksi antara kolektor dan mineral individu. Dengan menggunakan reagen pengubah yang selektif, sifat kolektor terhadap mineral tertentu dapat ditingkatkan atau dikurangi untuk mencapai pemisahan yang efisien antara mineral-mineral tersebut. Penggunaan reagen pengubah memungkinkan isolasi mineral sulfida individu seperti timbal, seng, dan tembaga dari bijih sulfida kompleks. Selain itu, reagen ini juga efektif untuk memisahkan mineral-mineral yang mengandung kalsium, seperti *fluorite*, *scheelite*, dan kalsit, secara selektif satu sama lain (Permana, 2011).

Dalam proses flotasi bijih tembaga-nikel sulfida, keberadaan mineral serpentinit secara signifikan dapat menurunkan kinerja flotasi tembaga sulfida. (Zhao *et al.*, 2020). Dengan pengecualian yang jarang terjadi, efektivitas reagen flotasi sangat bergantung pada pH *pulp*. Oleh karena itu, salah satu tujuan mendasarnya adalah untuk menentukan pH optimum untuk kombinasi reagen dan mineral tertentu. Ion H^+ dan OH^- bersaing dengan ion-ion lain yang ada di dalam larutan untuk mencapai permukaan mineral, yang mempengaruhi garam-garam disosiasi dan pertukaran ion. Gambar 10 menunjukkan jika reaktan tertarik oleh kemisorpsi,

maka ia hanya akan mencapai cakupan monolayer dan akan dapat berikatan dengan ion pada permukaan mineral (Castellon *et al.*, 2022)



Gambar 10 Mekanisme interaksi antara permukaan mineral sulfida dan kolektor (Castellon *et al.*, 2022)

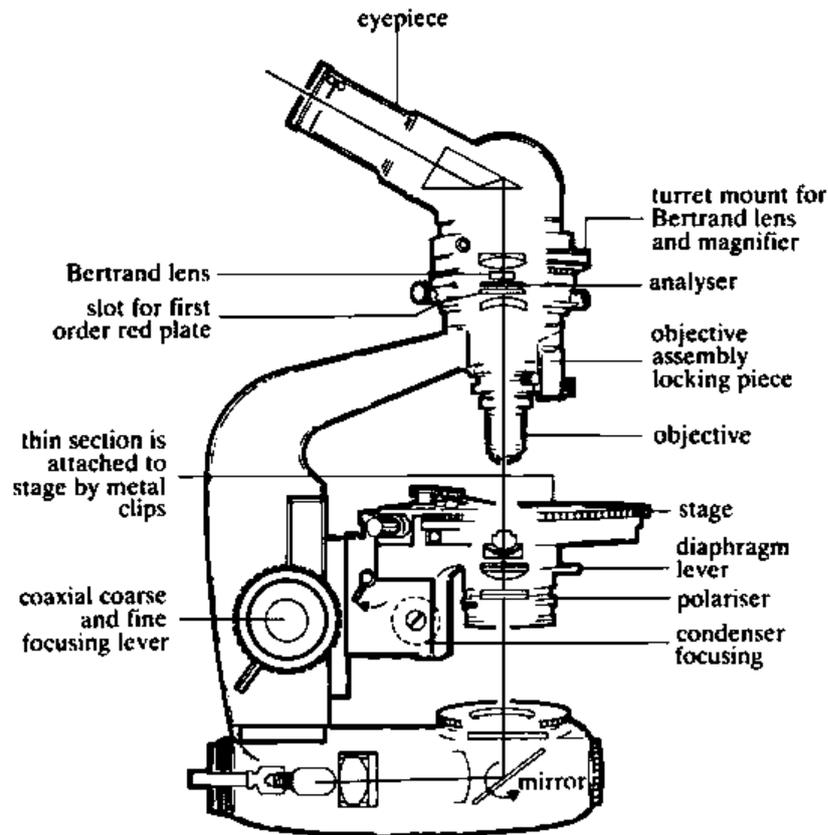
2.5 Analisis Mikroskop

Mikroskop, yang berasal dari kata Yunani "*micron*" yang berarti kecil dan "*scopes*" yang berarti melihat atau mengamati, adalah alat yang dirancang untuk memperbesar tampilan objek atau spesimen berukuran kecil agar dapat diamati dengan lebih jelas dan detail. Salah satu jenis mikroskop yang digunakan dalam penelitian ilmiah adalah mikroskop polarisasi, yang memanfaatkan cahaya terpolarisasi untuk mempelajari objek-objek tertentu, seperti sayatan tipis (*thin section*) batuan. Cahaya yang dihasilkan dari lampu pada mikroskop ini diarahkan melalui lensa objektif, memungkinkan pengamatan yang lebih jelas dan detail terhadap spesimen yang sedang diteliti (Sutarto dkk., 2019).

Mikroskop membantu mikrobiologis dalam atau specimen yang berukuran kecil. Mikroskop membantu mikrobiologis dalam mempelajari dan mendapatkan informasi tentang ciri-ciri organisme. Mikroskop mempelajari dan mendapatkan informasi tentang ciri-ciri organisme. Mikroskop pertama kali dikembangkan pada abad ke-16 yang menggunakan lensa sederhana pertama kali dikembangkan pada abad ke-16 yang menggunakan lensa sederhana untuk mengatur cahaya biasa. Ilmu yang mempelajari benda kecil dengan untuk mengatur cahaya biasa. Ilmu yang mempelajari benda kecil dengan menggunakan mikroskop disebut mikroskopi menggunakan mikroskop disebut mikroskopi. Perbesaran mikroskop bisa mencapai 270 sebenarnya (Gribble *and* Hall, 1985).

Mikroskop polarisasi pantul adalah alat penting dalam analisis mineral yang tidak tembus cahaya, dan tersedia dalam berbagai merek seperti Olympus, Meiji, Nikon, Motik, Carl Zeiss, dan Reichert, yang masing-masing memiliki keunggulan tersendiri dalam pengamatan. Meskipun prinsip dasar penggunaannya serupa, beberapa mikroskop dari merek Nikon, Meiji, dan Zeiss menonjol karena dilengkapi dengan dua sistem pencahayaan, yaitu refraksi dan refleksi. Kombinasi kedua sistem pencahayaan ini memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam penggunaan, karena memungkinkan mikroskop untuk melakukan pengamatan petrografi menggunakan sayatan tipis serta pengamatan mineragrafi menggunakan sayatan poles maupun sayatan tipis poles. Berbagai merek mikroskop polarisasi ini dapat dilihat pada Gambar 11. Dengan demikian, fitur-fitur canggih yang dimiliki oleh mikroskop ini tidak hanya memperluas kemampuan observasi, tetapi juga meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam analisis mineralogi (Sutarto dkk., 2019).

Mikroskop polarisasi adalah mikroskop yang menggunakan cahaya terpolarisasi untuk mengamati objek yang salah satunya merupakan sayatan tipis (*thin section*) batuan. Mikroskop petrografis modern menggunakan pencahayaan dari lampu yang berada di bagian bawah mikroskop yang ditembakkan ke arah lensa objektif. Perbedaan mikroskop polarisasi dengan mikroskop lain adalah terdapat 2 metode pengamatan berupa pengamatan nikol sejajar (*plane polarized light*) dan pengamatan nikol bersilang (*cross polarized light*). Bagian-bagian dan fungsi dari masing-masing bagian pada mikroskop petrografi secara umum adalah sebagai berikut (Gribble *and* Hall, 1985).



Gambar 11 Mikroskop polarisasi (Gribble *and* Hall, 1985)

2.6 Analisis XRD (*X-Ray Diffraction*)

Spektroskopi difraksi sinar-X (*X-ray diffraction/XRD*) adalah salah satu metode karakterisasi material yang paling lama digunakan dan masih merupakan salah satu teknik yang paling sering dipakai hingga saat ini. Teknik ini berfungsi untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi dan untuk mengukur ukuran partikel. Proses difraksi sinar-X melibatkan hamburan elastis foton-foton sinar-X oleh atom-atom dalam kisi periodik suatu material. Hamburan sinar-X monokromatis pada fasa kristalin tersebut menghasilkan interferensi konstruktif yang memungkinkan analisis struktur kristal. Penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal didasarkan pada persamaan Bragg, yang merupakan prinsip fundamental dalam teknik ini (Hastuti, 2011).

$$n.\lambda = 2.d.\sin \theta ; n = 1, 2 \quad (1)$$

dimana,

- λ = Panjang gelombang sinar-X
- n = Bilangan bulat (orde pembiasan)
- θ = Sudut antara sinar datang dengan bidang normal
- d = Jarak antara dua bidang kisi

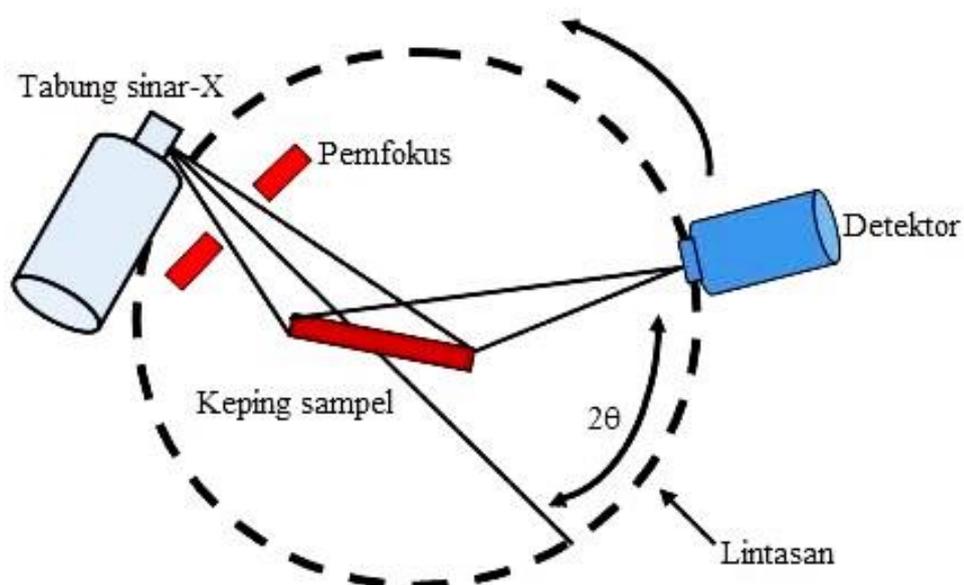
Berdasarkan persamaan Bragg, ketika seberkas sinar-X diarahkan pada sampel kristal, sinar-X tersebut akan dibiaskan oleh bidang-bidang kristal dalam sampel yang memiliki jarak antar kisi yang setara dengan panjang gelombang sinar-X. Proses pembiasan ini menghasilkan sinar yang kemudian ditangkap oleh detektor dan diterjemahkan sebagai puncak difraksi. Intensitas pembiasan yang dihasilkan semakin kuat seiring dengan jumlah bidang kristal yang terdapat dalam sampel. Setiap puncak pada pola difraksi sinar-X (XRD) mewakili satu bidang kristal dengan orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak ini selanjutnya dibandingkan dengan standar difraksi sinar-X yang tersedia untuk hampir semua jenis material (Hastuti, 2011).

Keuntungan utama penggunaan sinar-X dalam karakterisasi material terletak pada kemampuan penetrasinya yang tinggi, karena sinar-X memiliki energi yang sangat besar akibat panjang gelombangnya yang pendek. Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang antara 0,5 hingga 2,0 mikron dan dihasilkan melalui proses penembakan logam dengan elektron berenergi tinggi. Ketika elektron ini menembus logam, mereka mengalami perlambatan yang menyebabkan elektron-elektron di kulit atom logam terpental, sehingga menciptakan kekosongan. Elektron lain dengan energi lebih tinggi kemudian mengisi kekosongan tersebut dan memancarkan kelebihan energinya dalam bentuk foton sinar-X (Hastuti, 2011).

Metode difraksi sinar-X digunakan untuk menentukan struktur lapisan tipis yang terbentuk pada suatu sampel. Dalam proses ini, sampel ditempatkan pada penyangga sampel (*sample holder*) di dalam difraktometer sinar-X. Proses difraksi dimulai dengan menyalakan difraktometer, yang menghasilkan difraktogram sebagai output. Difraktogram ini menunjukkan hubungan antara sudut difraksi 2θ dan intensitas sinar-X yang dipantulkan. Sinar-X yang dipancarkan dari tabung sinar-X difraktometer kemudian difraksikan oleh sampel yang memiliki sifat konvergen. Sinar yang difraksikan tersebut diterima oleh slit yang ditempatkan

secara simetris terhadap fokus sinar-X. Selanjutnya, sinar-X ini ditangkap oleh detektor sintilator dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut kemudian diproses dengan menghilangkan komponen noise-nya dan dihitung sebagai analisis pulsa tinggi. Teknik difraksi sinar-X tidak hanya digunakan untuk mengetahui struktur kristal, tetapi juga untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia, dan keadaan yang memiliki keteraturan serupa (Hastuti, 2011).

Ketika sinar-X melewati suatu material, intensitas sinar yang ditransmisikan berkurang dibandingkan dengan intensitas awalnya. Penurunan ini disebabkan oleh kombinasi antara penyerapan sinar-X oleh atom-atom dalam material tersebut serta hamburan elastis yang terjadi di antara atom-atom. Hamburan ini mengubah arah perjalanan sinar-X tanpa mengurangi energi foton, namun sebagian sinar dapat dihamburkan keluar dari jalur asli. Berkas difraksi terbentuk ketika sinar-X yang dihamburkan saling memperkuat satu sama lain melalui interferensi konstruktif, yang terjadi ketika gelombang-gelombang memiliki fase yang sama. Sebaliknya, sinar-X yang fasenya berlawanan akan mengalami interferensi destruktif dan saling meniadakan. Untuk menghasilkan pola difraksi yang jelas, seperti yang sering diamati dalam eksperimen kristalografi, diperlukan perhitungan matematis yang akurat sesuai dengan hukum Bragg, yang menyatakan hubungan antara sudut hamburan, panjang gelombang sinar-X, dan jarak antar bidang atom dalam kristal, seperti yang dijelaskan dalam Gambar 12 (Smallman *and* Bishop, 2000).



Gambar 12 Metode difraksi sinar-X (Smallman *and* Bishop, 2000)

2.6 Analisis AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*)

Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) atau dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai Spektrofotometri Serapan Atom (SSA), adalah instrumen dalam kimia analisis yang bekerja berdasarkan prinsip energi yang diserap oleh atom. Spektrometri atomik merupakan metode pengukuran spektrum yang terkait dengan serapan dan emisi atom. Berdasarkan prinsip pengukurannya baik itu absorpsi maupun emisi terdapat dua jenis utama spektrofotometer nyala, yaitu Spektrofotometer Emisi Nyala dan Spektrofotometer Serapan Atom. Instrumen ini sering digunakan untuk menganalisis berbagai jenis logam, termasuk besi (Fe), tembaga (Cu), nikel (Ni), kadmium (Cd), timbal (Pb), seng (Zn), kromium (Cr), kobalt (Co), barium (Ba), silikon (Si), dan aluminium (Al) (Sugito dkk., 2020).

Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) adalah alat instrumen yang digunakan dalam metode analisis untuk menentukan konsentrasi unsur logam dan metaloid berdasarkan penyerapan radiasi oleh atom bebas. Prinsip kerja AAS didasarkan pada absorpsi cahaya oleh atom, di mana atom-atom menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu yang bergantung pada sifat masing-masing unsur. Sebagai teknik analisis kuantitatif, AAS memiliki aplikasi luas di berbagai bidang karena beberapa keunggulannya, seperti selektivitas, spesifisitas, dan biaya analisis yang relatif rendah. Metode ini hanya bergantung pada suhu untuk atomisasi sampel, sehingga memberikan hasil yang akurat dan konsisten. Setiap perangkat AAS terdiri dari tiga komponen utama: unit teratomisasi, sumber radiasi, dan sistem pengukur fotometrik (Wahab dkk., 2024).

AAS memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan spektrofotometer konvensional, antara lain keunggulan dalam hal spesifisitas dan batas deteksi yang lebih rendah, yang memungkinkan pengukuran berbagai unsur dalam larutan yang sama. Pengukuran dengan AAS dilakukan secara langsung pada sampel, dan hasilnya dapat segera dibaca, menjadikan metode ini cukup ekonomis dan dapat diterapkan pada berbagai jenis unsur dengan rentang konsentrasi yang luas, mulai dari level *part per million* (ppm) hingga persen (%). Namun, kelemahan dari metode ini adalah adanya pengaruh kimia, di mana AAS tidak mampu menguraikan zat menjadi atom sepenuhnya, seperti pengaruh fosfat terhadap pengukuran kalsium (Ca). Selain itu, terdapat juga pengaruh ionisasi ketika atom tereksitasi, bukan

hanya terdisosiasi, sehingga dapat menyebabkan emisi yang tidak diinginkan (Wahab dkk., 2024).

AAS juga merupakan alat yang digunakan dalam metode analisis kimia untuk menentukan unsur-unsur logam dan metaloid berdasarkan prinsip penyerapan cahaya oleh atom dalam keadaan bebas. Pada metode AAS, atom-atom logam menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu yang sesuai dengan sifat unsur tersebut. Cahaya pada panjang gelombang ini memiliki energi yang cukup untuk mengubah tingkat energi elektronik atom, sehingga memungkinkan pengukuran konsentrasi logam. Proses ini melibatkan absorpsi sinar oleh atom-atom netral dari unsur logam yang berada dalam keadaan dasar (*ground state*). Menurut Khopkar (1990), prinsip dasar AAS serupa dengan absorpsi sinar oleh molekul atau ion dalam larutan (Lolo dkk., 2020).

$$A = -\log \frac{I_0}{I_t} = \epsilon bc \quad (2)$$

$$A = -\log \frac{I_0}{I_t} = -\log T \quad (3)$$

dimana,

A = absorbansi

I_0 = intensitas sumber sinar

I_t = intensitas sinar yang diteruskan

ϵ = absorbtivitas molar (mol/liter)

b = panjang medium atau tebal nyala (nm)

c = konsentrasi atom – atom yang menyerap sinar (ppm)

T = transmita

Berdasarkan persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi atom dalam sampel. Oleh karena itu, analisis kadar logam berat seperti Pb, Cu, dan Cd dapat dilakukan menggunakan metode AAS. Metode AAS ini dipilih karena memiliki sensitivitas yang tinggi, mudah digunakan, ekonomis, sederhana, dan membutuhkan jumlah sampel yang relatif sedikit. Selain itu, analisis menggunakan AAS lebih sensitif dan mampu mengukur kadar unsur dengan konsentrasi yang sangat rendah tanpa memerlukan proses pemisahan terlebih dahulu (Lolo *et al.*, 2020).