

***MONITORING* PROSES FLOTASI KOLOM MENGGUNAKAN
SINYAL KAPASITANSI PADA PIRIT DENGAN
VARIASI DOSIS KOLEKTOR DAN
PERSEN SOLID**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Naura Kamila Setiyohadi
3334200093

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN**

2025

LEMBAR PENGESAHAN

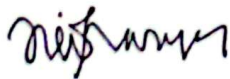
**MONITORING PROSES FLOTASI KOLOM MENGGUNAKAN
SINYAL KAPASITANSI PADA PIRIT DENGAN
VARIASI DOSIS KOLEKTOR DAN
PERSEN SOLID**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Dr. Didied Haryono, ST., MT.
NIP. 196705302002121001

Pembimbing II



Bening Nurul Hidayah Kambuna, ST., MT.
NIP. 199008292020122013

LEMBAR PERSETUJUAN

**MONITORING PROSES FLOTASI KOLOM MENGGUNAKAN
SINYAL KAPASITANSI PADA PIRIT DENGAN
VARIASI DOSIS KOLEKTOR DAN
PERSEN SOLID**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Naura Kamila Setiyohadi

3334200093

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal **13 Januari 2025**

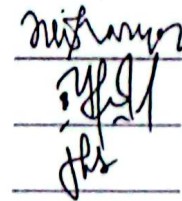
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji I : Dr. Didied Haryono, ST., MT.

Penguji II : Bening Nurul Hidayah Kambuna, ST., MT.

Penguji III : Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si.



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : *Monitoring* Proses Flotasi Kolom Menggunakan Sinyal
Kapasitansi pada Pirit dengan Variasi Dosis Kolektor dan
Persen Solid
Nama Mahasiswa : Naura Kamila Setiyohadi
NIM : 3334200093
Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, Desember 2024



Naura Kamila Setiyohadi
NIM. 3334200093

ABSTRAK

Flotasi merupakan proses pemisahan mineral berharga dengan pengotornya berdasarkan perbedaan sifat permukaan partikel. Performa flotasi kolom biasanya dinyatakan dalam nilai *recovery*. Proses flotasi terdiri dari *rougher* dan *cleaner*; flotasi kolom merupakan salah satu jenis dari flotasi *cleaner*. Teknologi *machine vision* umum digunakan untuk memonitor proses flotasi ini, namun memiliki keterbatasan, karena hanya mengamati fenomena yang terjadi pada permukaan saja (sumbu x dan y), sementara proses utama pemisahan terjadi di *collection zone* atau pada sumbu-z. Penelitian ini bertujuan untuk memantau proses flotasi kolom pada mineral pirit menggunakan sensor kapasitif yang diletakkan pada *collection zone* dengan variasi dosis kolektor dan persen solid. Hasil pantauan ini diharapkan dapat menghitung nilai *recovery* secara *real time*. Sensor kapasitif digunakan untuk mengukur sinyal kapasitansi, yang berkorelasi dengan interaksi partikel mineral dan gelembung udara dalam zona koleksi kolom flotasi. Variasi parameter proses meliputi dosis kolektor potassium amyl xanthate (20, 30, 40, dan 50 ppm) serta persen solid (10%, 15%, 20%, dan 25%). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan dosis kolektor mampu meningkatkan *recovery* hingga mencapai nilai optimal sebesar 77,06% pada dosis kolektor 50 ppm yang diikuti dengan nilai kapasitansi sebesar 9,197 pF. Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kapasitansi yang dihasilkan mempunyai hubungan linear dengan *recovery* yang dihasilkan.

Kata kunci: Flotasi Kolom, Pirit, Sensor Kapasitif, *Recovery*, Kolektor, Persen Solid.

ABSTRACT

Flotation is a process for separating valuable minerals from impurities based on differences in particle surface properties. The performance of column flotation is typically expressed in terms of recovery, which requires monitoring for process optimization. Machine vision technology is commonly used to monitor the flotation process; however, it has limitations as it only observes surface phenomena (x and y axes), while the primary separation process occurs in the collection zone or along the z-axis. This study aims to monitor the column flotation process of pyrite minerals using capacitive sensors with variations in collector dosage and solid percentage. The column flotation method was chosen for its ability to enhance the efficiency of separating valuable minerals from impurities through a counter-current flow mechanism and the use of wash water. A capacitive sensor was used to measure capacitance signals, which correlate with the interaction between mineral particles and air bubbles in the flotation column's collection zone. The process parameters varied include potassium amyl xanthate collector dosage (20, 30, 40, and 50 ppm) and solid percentage (10%, 15%, 20%, and 25%). The results indicate that increasing the collector dosage enhances recovery, reaching an optimal value of 77.06% at a 50 ppm collector dosage. The optimal solid percentage was found to be 15%, with a recovery of 50.15%. This study demonstrates that capacitance measurements exhibit a linear relationship with recovery, where an increase in capacitance indicates higher polarization of mineral particles.

Keywords: Column Flotation, Pyrite, Capacitive Sensor, Recovery, Collector, Solid Percentage.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul "*Monitoring* Proses Flotasi Kolom Menggunakan Sinyal Kapasitansi pada Pirit dengan Variasi Dosis Kolektor dan Persen Solid". Skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat kelulusan pada program sarjana di Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari proses pengerjaan skripsi ini banyak dibantu oleh beberapa pihak, maka dari itu penulis mengucapkan rasa terimakasih rasa terima kasih dengan tulus kepada:

1. Bapak Abdul Aziz., S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
3. Bapak Dr. Didied Haryono, S.T., M.T. selaku pembimbing I dan Ibu Bening Kambuna Nurul Hidayah, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang telah bersedia meluangkan waktunya, memberikan bimbingan dan masukan sehingga dapat terselesaikannya skripsi ini.
4. Kedua orang tua penulis, Nurkholied Setiyohadi dan Yuliasari yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran akan penulis nantikan. Besar harapan penulis dengan menyusun skripsi ini untuk menjadi sebuah acuan penelitian dan bermanfaat bagi pembacanya. Atas perhatiaanya, diucapkan terima kasih.

Cilegon, Desember 2024

Naura Kamila Setiyohadi

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Flotasi.....	8
2.2 Flotasi Kolom.....	9
2.3 Reagen Flotasi.....	12
2.3.1 Kolektor	12
2.3.2 <i>Frother</i>	16
2.4 Persen Solid.....	16
2.5 Performa Metalurgi	17
2.6 Sensor Kapasitif	18
2.7 Grain Counting.....	20
BAB III METODE PENELITIAN	23

3.1 Diagram Alir Penelitian	23
3.2 Alat dan Bahan	24
3.2.1 Alat-alat yang Digunakan	24
3.2.2 Bahan-bahan yang Digunakan	25
3.3 Prosedur Penelitian	25
3.3.1 Tahap Preparasi Sampel.....	25
3.3.2 Persiapan Sensor Kapasitansi	28
3.3.3 Persiapan Proses Flotasi	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Percobaan Pendahuluan	31
4.1.1 Pengaruh Ukuran Partikel terhadap <i>Recovery</i>	31
4.2 Pengaruh Dosis Kolektor terhadap Performa Metalurgi.....	32
4.3 Pengaruh Persen Solid terhadap Performa Metalurgi	36
4.4 Hubungan antara Performa Metalurgi dengan Sinyal Kapasitansi	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN A.....	56
LAMPIRAN B	116
LAMPIRAN C.....	139
LAMPIRAN D.....	147

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel A.1 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm	57
Tabel A. 2 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Dosis Kolektor 30 ppm	57
Tabel A. 3 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm	58
Tabel A. 4 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm	59
Tabel A. 5 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Persen Solid 10%	59
Tabel A. 6 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Persen Solid 15%	60
Tabel A. 7 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Persen Solid 20%	61
Tabel A. 8 Massa Konsentrat dan <i>Tailing</i> Variasi Persen Solid 25%	61
Tabel A. 9 <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm	62
Tabel A. 10 <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 30 ppm	63
Tabel A. 11 <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm	65
Tabel A. 12 <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm	66
Tabel A. 13 <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10%	68
Tabel A. 14 <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15%	69
Tabel A. 15 <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20%	71
Tabel A. 16 <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 25%	72
Tabel A. 17 Data Kapasitometer Variasi Dosis Kolektor 20 ppm	74
Tabel A. 19 Data Kapasitometer Variasi Dosis Kolektor 40 ppm	76
Tabel A. 20 Data Kapasitometer Variasi Dosis Kolektor 50 ppm	77
Tabel A. 21 Data Kapasitometer Variasi Persen Solid 10%	78
Tabel A. 22 Data Kapasitometer Variasi Persen Solid 15%	79

Tabel A. 23 Data Kapasitometer Variasi Persen Solid 20%.....	80
Tabel A. 24 Data Kapasitometer Variasi Persen Solid 25%.....	81
Tabel B. 1 Penentuan Dosis Kolektor.....	118
Tabel B.2 Kadar FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 20 ppm.....	119
Tabel B.3 Kadar FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 30 ppm.....	120
Tabel B. 4 Kadar FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 40 ppm.....	120
Tabel B. 5 Kadar FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 50 ppm.....	121
Tabel B. 6 Kadar FeS_2 pada Variasi Persen Solid 10%.....	122
Tabel B. 7 Kadar FeS_2 pada Variasi Persen Solid 15%.....	123
Tabel B. 8 Kadar FeS_2 pada Variasi Persen Solid 20%.....	123
Tabel B. 9 Kadar FeS_2 pada Variasi Persen Solid 25%.....	124
Tabel B. 10 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 20 ppm.....	126
Tabel B. 11 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 30 ppm.....	126
Tabel B. 12 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 40 ppm.....	127
Tabel B. 13 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Dosis Kolektor 50 ppm.....	128
Tabel B. 14 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Persen Solid 10%.....	129
Tabel B. 15 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Persen Solid 15%.....	129
Tabel B. 16 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Persen Solid 20%.....	130
Tabel B. 17 <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i> FeS_2 pada Variasi Persen Solid 25%.....	131

Tabel B. 18 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Dosis Kolektor 20 ppm.....	132
Tabel B. 19 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Dosis Kolektor 30 ppm.....	133
Tabel B. 20 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Dosis Kolektor 40 ppm.....	133
Tabel B. 21 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Dosis Kolektor 50 ppm.....	134
Tabel B. 22 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Persen Solid 10%	135
Tabel B. 23 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Persen Solid 15%	136
Tabel B. 24 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Persen Solid 20%	137
Tabel B. 25 Kapasitansi Terukur dan Kumulatif Kapasitansi pada Variasi Persen Solid 25%	137

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Sudut Kontak Fasa Padat, Cair, dan Udara	8
Gambar 2. 2 Flotasi Kolom	10
Gambar 2. 3 Skema Adsorpsi Molekul Kolektor pada Permukaan Mineral.....	13
Gambar 2. 4 Struktur Kolektor Xanthate.	14
Gambar 2. 5 Pengaruh Penambahan Kolektor PAX terhadap <i>Recovery</i> Proses Flotasi Pirit.	15
Gambar 2.6 Kapasitor pelat sejajar.	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 3.2 <i>Jaw Crusher</i>	26
Gambar 3.3 <i>Ball Mill</i>	27
Gambar 3.4 Ayakan	27
Gambar 3.5 <i>Channel</i> 18 dan <i>Channel</i> 19	28
Gambar 3. 6 Rangkaian <i>Monitoring</i> Flotasi Kolom Skematis.....	29
Gambar 3. 7 Rangkaian <i>Monitoring</i> Flotasi Kolom Aktual.....	30
Gambar 4.1 Kurva Hasil Percobaan Pendahuluan Ukuran Partikel.....	32
Gambar 4.2 Kurva Kadar Rata-Rata pada Variasi Dosis Kolektor.....	33
Gambar 4.3 Kurva <i>Recovery</i> Flotasi Kolom dengan Variasi Dosis Kolektor.....	34
Gambar 4. 4 Mekanisme Adsorpsi Kolektor	35
Gambar 4.5 Kurva Kadar Rata-Rata pada Variasi Persen Solid.....	37
Gambar 4.6 Kurva <i>Recovery</i> pada Variasi Persen Solid.....	38
Gambar 4. 7 Ilustrasi Fenomena Koalesensi.....	39

Gambar 4. 8 Kurva Kadar dan Kapasitansi Variasi Dosis Kolektor a) 20 ppm, b) 30 ppm, c) 40 ppm, d) 50 ppm	41
Gambar 4. 9 Kurva Kadar dan Kapasitansi Variasi Persen Solid a) 10%.....	42
Gambar 4. 10 Kurva <i>Recovery</i> dan Kapasitansi Variasi Persen Solid.....	45
Gambar 4. 11 Kurva <i>Recovery</i> dan Kapasitansi Variasi Dosis Kolektor.....	47
Gambar 4. 12 Hubungan Kapasitansi terhadap <i>Recovery</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm	48
Gambar A. 1 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-60, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9.....	82
Gambar A. 2 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-90, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	82
Gambar A. 3 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-120, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	83
Gambar A. 4 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-150, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	83
Gambar A. 5 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-180, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	84
Gambar A. 6 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-210, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	84
Gambar A. 7 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-240, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	85
Gambar A. 8 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-300, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	85
Gambar A. 9 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-360, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	86
Gambar A. 10 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 20 ppm detik-420, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	86
Gambar A. 11 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-60, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	87
Gambar A. 12 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-90, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	87

Gambar A. 13 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-120, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	88
Gambar A. 14 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-150, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	88
Gambar A. 15 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-180, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	89
Gambar A. 16 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-210, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	89
Gambar A. 17 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-240, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	90
Gambar A. 18 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-270, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	90
Gambar A. 19 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-300, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	91
Gambar A. 20 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-360, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	91
Gambar A. 21 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-420, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	92
Gambar A. 22 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 40 ppm detik-480, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	92
Gambar A. 23 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-60, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	93
Gambar A. 24 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-90, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	93
Gambar A. 25 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-120, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	94
Gambar A. 26 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-150, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	94
Gambar A. 27 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-180, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	95
Gambar A. 28 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-210, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	95

Gambar A. 29 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-240, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	96
Gambar A. 30 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-270, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	96
Gambar A. 31 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-300, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	97
Gambar A. 32 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-360, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	97
Gambar A. 33 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-420, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	98
Gambar A. 34 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-480, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	98
Gambar A. 35 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Dosis Kolektor 50 ppm detik-540, a)	
Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	99
Gambar A. 36 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-60, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	99
Gambar A. 37 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-90, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	100
Gambar A. 38 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-120, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	100
Gambar A. 39 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-150, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	101
Gambar A. 40 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-180, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	101
Gambar A. 41 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-210, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	102
Gambar A. 42 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-240, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	102
Gambar A. 43 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-300, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	103
Gambar A. 44 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 10% Detik-360, a) Kotak	
1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	103

Gambar A. 45 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-60, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	104
Gambar A. 46 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-90, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	104
Gambar A. 47 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-120, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	105
Gambar A. 48 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-150, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	105
Gambar A. 49 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-180, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	106
Gambar A. 50 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-210, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	106
Gambar A. 51 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-240, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	107
Gambar A. 52 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-270, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	107
Gambar A. 53 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-300, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	108
Gambar A. 54 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-360, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	108
Gambar A. 55 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-420, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	109
Gambar A. 56 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-480, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	109
Gambar A. 57 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-60, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	110
Gambar A. 58 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 15% Detik-90, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	110
Gambar A. 59 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-60, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	111
Gambar A. 60 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-90, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	111

Gambar A. 61 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-120, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	112
Gambar A. 62 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-150, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	112
Gambar A. 63 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-180, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	113
Gambar A. 64 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-210, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	113
Gambar A. 65 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-240, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	114
Gambar A. 66 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-270, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	114
Gambar A. 67 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-300, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	115
Gambar A. 68 Citra <i>Grain Counting</i> Variasi Persen Solid 20% Detik-360, a) Kotak 1, b) Kotak 3, c) Kotak 5, d) Kotak 7, e) Kotak 9	115
Gambar C. 1 a) “Open” untuk Membuka File Citra, b) Memilih File Citra pada Folder di PC.....	141
Gambar C. 2 Pada Menu “Image”, Pilih “Adjust” dan Pilih “Color Threshold”	141
Gambar C. 3 Atur Interval “Saturation” dan “Brightness” untuk Partikel Pirit..	142
Gambar C. 4 Atur Interval “Saturation” dan “Brightness” untuk Partikel Kuarsa	142
Gambar C. 5 Pada “Process”, pilih “Binary” lalu “Make Binary”	143
Gambar C. 6 Pada “Process”, pilih “Binary” lalu “Convert to Mask”	143
Gambar C. 7 Pada “Process”, pilih “Binary” lalu “Fill Holes”	144
Gambar C. 8 Pada “Process”, pilih “Binary” lalu “Watershed”.....	144
Gambar C. 9 Pada “Analyze”, pilih “Analyze Particles”.....	145
Gambar C. 10 Pilih “Summarize” dan Pilih “OK”	145
Gambar C. 11 Analisis Jumlah Butiran untuk Salah Satu Jenis Bijih.....	146
Gambar E.1 <i>Ball Mill</i>	148

Gambar E.2 <i>Chopper</i>	148
Gambar E.3 Ember.....	148
Gambar E.4 <i>Flowmeter</i>	148
Gambar E.5 Gelas Kimia 500 mL.....	148
Gambar E.6 <i>Jaw Crusher</i>	149
Gambar E.7 Kapasitometer	149
Gambar E.8 Kolom Flotasi	149
Gambar E.9 Kompresor Udara.....	149
Gambar E.10 Kabel Konektor.....	149
Gambar E.11 <i>Hand mixer</i>	149
Gambar E.12 Nampan Logam.....	149
Gambar E.13 Neraca Digital	150
Gambar E.14 Oven.....	150
Gambar E.15 Ayakan 150# dan 200#	150
Gambar E.16 <i>Stabilizer</i>	150
Gambar E.18 <i>Water Sprayer</i>	150
Gambar E.19 <i>Frother Pine Oil</i>	151
Gambar E.20 Kolektor Potassium Amyl Xanthate	151
Gambar E.21 Kuarsa (SiO ₂).....	151
Gambar E.22 FeS ₂	151

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki cadangan bijih besi yang melimpah yang mencapai 2,9 miliar ton dengan persebaran utama di Sumatera, Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi [1]. Mineral bijih besi utama yang ditemukan di Indonesia meliputi hematit, magnetit, goethit, dan pirit. Di antara mineral tersebut, pirit (FeS_2) sering kali dianggap kurang bernilai, meskipun memiliki potensi besar sebagai sumber daya bernilai tinggi apabila dikelola dengan proses yang tepat [2]. Dalam pengolahan bijih pirit, salah satu tantangan utama adalah memisahkan pirit dari mineral pengotor, seperti kuarsa. Proses ini memerlukan teknologi konsentrasi yang efektif, yang mampu memanfaatkan perbedaan sifat fisik antara pirit dan kuarsa. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah konsentrasi flotasi, yang memanfaatkan sifat permukaan mineral untuk melakukan pemisahan [3].

Flotasi adalah proses pemisahan mineral berharga dari pengotornya dengan memanfaatkan sifat permukaan mineral yaitu hidrofobik dan hidrofilik. Prinsip kerja flotasi adalah partikel dengan sifat hidrofobik (sukar berinteraksi dengan air) akan menempel pada gelembung udara, terangkat ke permukaan, dan terkumpul sebagai konsentrat. Sementara itu, partikel dengan sifat hidrofilik (mampu berinteraksi dengan air) akan tetap berada di bawah permukaan dan menjadi *tailing*. Flotasi kolom merupakan metode flotasi yang digunakan untuk pemisahan mineral berharga dan pengotornya dengan menciptakan gelembung udara yang dihasilkan

oleh aliran udara melalui *sparger*. Flotasi kolom efektif untuk digunakan karena metode ini menggunakan aliran *conter-current* yang dapat mengurangi partikel mineral yang terjebak akibat kurangnya derajat liberasi [4]. Selain itu, sistem flotasi kolom yang memiliki *wash water* yang dapat mengoptimasi tingkat perolehan mineral berharga tanpa mengurangi kadar yang terkandung di dalamnya. Dalam proses optimasi perolehan mineral berharga pada flotasi kolom, diperlukan metode pemantauan yang akan memberikan data *real-time* untuk mengetahui tingkat perolehan serta kadar mineral berharga. Hal ini penting mengingat dimensi dari flotasi kolom yang memiliki ketinggian 1-13 meter yang membutuhkan waktu cukup lama untuk mengetahui dan menghitung hasil perolehan dalam metode flotasi kolom [5]. Oleh karena itu, salah satu bentuk optimasi metode flotasi kolom adalah dengan memantau karakteristik partikel selama proses flotasi berlangsung. Pengamatan partikel dilakukan dengan meninjau ukuran, bentuk, sifat permukaan, distribusi ukuran, dan viskositas *pulp*.

Sensor berbasis sinyal kapasitansi merupakan sensor yang mendeteksi perubahan nilai kapasitansi listrik yang disebabkan oleh perubahan konstanta dielektrik. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip kapasitansi, pada dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh material dielektrik (padat, cair, atau gas). Penggunaan sensor berbasis sinyal kapasitansi dapat menjadi solusi dalam mengetahui karakteristik gelembung yang terbentuk pada flotasi kolom. Sensor berbasis sinyal kapasitansi ini mengukur nilai kapasitansi didasarkan pada perbedaan sifat permitivitas relatif pada material. Berdasarkan hasil penelitian Nugraha tahun 2020, sensor berbasis sinyal kapasitansi menunjukkan hasil yang

baik untuk digunakan dalam proses flotasi kolom [6]. Studi tersebut berhasil mengkarakterisasi efek dosis *frother* dalam proses flotasi kolom menggunakan metode pengukuran kapasitif. Sensor kapasitif yang dipasang di zona *collection* dan mampu mendeteksi perbedaan karakteristik sinyal antara kondisi dengan dan tanpa *frother*, serta perubahan sinyal seiring peningkatan dosis *frother* dan laju alir udara. Hal ini menunjukkan sensitivitas sensor terhadap perubahan kondisi dalam kolom flotasi. Penelitian sebelumnya yang diuraikan oleh Haryono tahun 2020, menjelaskan penggunaan *Electrical Capacitance Volume Tomography* (ECVT) sebagai teknologi sensor berbasis sinyal kapasitansi telah terbukti efektif dalam memantau proses flotasi kolom, peningkatan dosis kolektor berpengaruh terhadap kapasitansi yang diukur selama proses berlangsung [7]. Kolektor berfungsi untuk meningkatkan sifat hidrofobik partikel mineral, nilai kapasitansi menunjukkan adanya peningkatan partikel yang terikat dengan gelembung udara. Peningkatan nilai kapasitansi linear dengan peningkatan *recovery* yang dihasilkan selama proses flotasi. Penelitian yang dilakukan Haryono dkk. pada tahun 2017 mengungkapkan sinyal kapasitansi meningkat dengan bertambahnya persen solid karena lebih banyak partikel mineral dalam kolom yang menyebabkan peningkatan efek polarisasi [8]. Sebaliknya, laju aliran udara yang tinggi menurunkan sinyal kapasitansi karena udara memiliki konstanta dielektrik yang rendah, sehingga mengurangi nilai kapasitansi. Sinyal kapasitansi yang dihasilkan menunjukkan korelasi yang baik dengan *recovery*, dengan melihat korelasi linier antara sinyal kapasitansi dan *recovery* memiliki koefisien determinasi 0,78 untuk 10% padatan, yang menunjukkan bahwa sinyal kapasitansi dapat digunakan untuk memprediksi

kinerja metalurgi secara efektif [8]. Kinerja metalurgi atau performa metalurgi merupakan kemampuan proses pemisahan mineral untuk mencapai hasil yang optimal, seperti *recovery* dan kadar, yang menunjukkan secara kuantitatif seberapa baik nilai mineral berharga dalam *feed* dapat dimanfaatkan dan seberapa murni produk akhir dari pengotor [9].

Dengan pemanfaatan sensor kapasitif sebagai alat peninjau interaksi antara gelembung dan partikel, karakteristik stabilitas gelembung menjadi aspek yang dibutuhkan dalam optimasi proses pemisahan mineral sulfida. Optimasi sistem sensor pemisahan partikel mineral sulfida yang dipantau dengan sensor kapasitif, proses pemisahan menggunakan metode flotasi kolom dilakukan menggunakan variasi dosis kolektor dan persen solid. Variasi dosis kolektor dapat berpengaruh pada performa metalurgi untuk mengubah sifat permukaan mineral menjadi hidrofobik, ketika partikel bertabrakan dengan gelembung, kemungkinan untuk melekat pada gelembung tergantung pada sifat hidrofobik dari permukaan mineral, meskipun mineral sulfida memiliki floatabilitas alami, namun beberapa kondisi seringkali tidak cukup untuk mencapai *recovery* yang tinggi, sehingga perlu dilakukan penambahan kolektor. Terdapat hubungan yang berbanding lurus antara variasi persen solid dan *recovery*. Ketika persen solid meningkat, jumlah partikel dalam sel juga bertambah, sehingga peluang partikel untuk melekat pada gelembung semakin besar dan menghasilkan *recovery* yang lebih tinggi. Pada penelitian ini, diharapkan sensor kapasitif dapat melihat pengaruh penambahan dosis kolektor dan persen solid terhadap performa metalurgi pada bijih pirit pada proses flotasi kolom dan diharapkan dapat memperluas dan menerapkan teknologi

sensor kapasitif untuk memantau proses flotasi kolom.

1.2 Identifikasi Masalah

Dari latar belakang permasalahan yang telah dipaparkan, terdapat beberapa masalah utama yang diidentifikasi terkait dengan *monitoring* proses flotasi pada pengolahan bijih pirit menggunakan sensor kapasitif. Masalah yang dapat diidentifikasi untuk penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi dosis kolektor dan persen solid terhadap nilai *recovery* flotasi kolom pada bijih pirit serta nilai kapasitansi yang didapatkan dari sensor kapasitif?
2. Bagaimana efektivitas penggunaan sensor kapasitif dalam memonitor proses flotasi kolom untuk bijih pirit secara *real-time*?
3. Bagaimana korelasi antara sinyal kapasitansi dengan nilai *recovery*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui dan memahami *monitoring* proses flotasi kolom menggunakan sensor kapasitif
2. Mengetahui keberhasilan sensor kapasitif dengan memonitor proses flotasi kolom pada pirit.
3. Mengetahui hubungan nilai kurva kapasitansi listrik terhadap nilai persen *recovery* dengan pengaruh dosis kolektor dan persen solid.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan bijih pirit sebagai partikel hidrofobik dan bijih kuarsa sebagai partikel hidrofilik.
2. Preparasi bahan berupa peremukan, penggerusan, dan pengayakan bijih menggunakan ayakan 100# dan 150# yang dilakukan di Laboratorium Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Parameter yang dibuat tetap dalam penelitian ini meliputi:
 - a. Ukuran partikel -100#+150#
 - b. Waktu *conditioning* selama 10 menit.
 - c. *Frother pine oil* digunakan sebanyak 40 ppm
 - d. Laju alir udara yang digunakan 2 L/menit
 - e. pH yang digunakan 10
4. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu dosis kolektor *potassium amyl xanthate* 20; 30; 40; dan 50 ppm serta persen solid 20; 30; 40; dan 50%
5. Analisis kadar dilakukan dengan metode *grain counting* dan perhitungan butir dilakukan dengan ImageJ.
6. Penelitian dilakukan di Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium *Advanced Materials and Tomography* Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun dalam lima bab. Bab I terdiri dari lima sub-bab, yaitu latar belakang penelitian ini dilakukan, identifikasi masalah dari latar belakang, tujuan penelitian ini dilakukan, batasan terhadap masalah yang akan diteliti, serta sistematika penulisan dari skripsi. Bab II adalah tinjauan pustaka berisi teori yang melandasi penelitian. Bab III merupakan metode penelitian berisi diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur yang dilakukan untuk memperoleh data penelitian. Bab IV berisi analisis dan pembahasan dari data yang diperoleh. Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran aspek yang perlu dikaji lebih lanjut untuk pengembangan penelitian diuraikan di Bab V. Referensi yang digunakan dalam penyusunan skripsi dicantumkan di daftar pustaka. Data penelitian yang diperoleh, contoh perhitungan, prosedur analisis dengan bantuan *software* dan dokumentasi pendukung terdapat pada bagian Lampiran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM RI, 'Besi Indonesia', *Peluang Investasi Besi Indones.*, p. 42, 2022.
- [2] E. Forbes, M. Jefferson, U. Yenial-Arslan, C. Curtis-Morar, and R. O'Donnell, 'Solving the mystery of natural pyrite flotation – A mineralogy-based approach', *Miner. Eng.*, vol. 207, no. October 2023, p. 108544, 2024, doi: 10.1016/j.mineng.2023.108544.
- [3] B. A. Wills and J. A. Finch, 'Froth Flotation', *Wills' Miner. Process. Technol.*, no. 1984, pp. 265–380, 2016, doi: 10.1016/b978-0-08-097053-0.00012-1.
- [4] D. Haryono *et al.*, 'Investigation of column flotation process on sulphide ore using 2-electrode capacitance sensor: The effect of air flow rate and solid percentage', *AIP Conf. Proc.*, vol. 1945, pp. 2–7, 2018, doi: 10.1063/1.5030267.
- [5] B. A. Wills and J. A. Finch, 'Froth Flotation', in *Wills' Mineral Processing Technology*, no. 1984, 2016, pp. 265–380.
- [6] H. Nugraha, A. N. Fitriani, D. Haryono, M. Al Huda, W. P. Taruno, and S. Harjanto, 'Signal characterization of frother dosage effect in two- phase column flotation process using capacitive measurement method', *AIP Conf. Proc.*, vol. 2232, no. April, 2020, doi: 10.1063/5.0001979.
- [7] D. Haryono, I. Darmabakti, S. Oediyani, and S. Harjanto, 'Monitoring of Column Flotation Process in Collection Zone using ECVT with the Effect of Collector and Frother Doses to Recovery', *Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 2020, doi: 10.25105/ms.v11i1.7442.

- [8] D. Haryono, S. Harjanto, H. Nugraha, M. Al Huda, and W. P. Taruno, 'Column flotation monitoring based on electrical capacitance volume tomography: A preliminary study', *AIP Conf. Proc.*, vol. 1805, 2017, doi: 10.1063/1.4974436.
- [9] C. K. Gupta, *Chemical Metallurgy Principles and Practice*. 2003.
- [10] R. Prakash, S. K. Majumder, and A. Singh, 'Flotation technique: Its mechanisms and design parameters', *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 127, pp. 249–270, 2018, doi: 10.1016/j.cep.2018.03.029.
- [11] B. A. Wills and J. A. Finch, 'Froth Flotation', *Wills' Miner. Process. Technol.*, no. 1984, pp. 265–380, 2016, doi: 10.1016/b978-0-08-097053-0.00012-1.
- [12] National Center for Biotechnology Information, 'PubChem Compound Summary for CID 493949, Potassium pentylxanthate', *PubChem*, 2024. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Potassium-pentylxanthate> (accessed Dec. 18, 2024).
- [13] D. Wang, 'Flotation reagents', in *Applied Surface Chemistry on Minerals Flotation and Energy Resources Beneficiation: Volume 1: Functional Principle*, 2016, pp. 1–382.
- [14] P. Forson, M. Zanin, W. Skinner, and R. Asamoah, 'Differential flotation of pyrite and arsenopyrite: Effect of hydrogen peroxide and collector type', *Miner. Eng.*, vol. 163, no. December 2020, p. 106808, 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.106808.
- [15] G. Güven, B. Tunç, B. Aydın, and G. Bulut, 'Effects of frothers on bubbles size and flotation performance of hydrophobic minerals', *J. Cent. South Univ.*, vol. 31, no. 7, pp. 2280–2299, 2024, doi: 10.1007/s11771-024-5685-5.

- [16] J. Yianatos, C. Carrasco, L. Vinnett, and I. Rojas, 'Pyrite recovery mechanisms in rougher flotation circuits', *Miner. Eng.*, vol. 66, pp. 197–201, 2014, doi: 10.1016/j.mineng.2014.03.020.
- [17] A. Azizi, 'Influence of collector dosage and pulp chemistry on copper flotation', *Geosystem Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 311–316, 2014, doi: 10.1080/12269328.2014.994787.
- [18] S. Bahtiar, W. Muzakki, R. Desiasni, F. Widyawati, and S. Hidayat, 'Pengaruh Ukuran Partikel, Persen Padatan, dan pH pada Proses Flotasi Terhadap Perolehan Kembali Tembaga', *J. Pijar Mipa*, vol. 16, no. 3, pp. 406–410, 2021, doi: 10.29303/jpm.v16i3.1308.
- [19] S. M. Siagian, G. W. Jaya, and I. Nurhidayati, 'Analisis Jumlah Muatan Listrik Serta Energi Pada Kapasitor Berdasarkan Konstanta Dielektrik Suatu Material', *ORBITA J. Kajian, Inov. dan Apl. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 1, p. 176, 2021, doi: 10.31764/orbita.v7i1.4420.
- [20] M. Sidi, B. P. Lapanporo, and Y. Arman, 'Perbandingan Kapasitansi dari Beberapa Jenis Bahan Menggunakan Kapasitor Silinder', *Prism. Fis.*, vol. 8, no. 2, p. 128, 2020, doi: 10.26418/pf.v8i2.42528.
- [21] B. E. Cahyono, M. Misto, and F. Hasanah, 'Karakterisasi Sensor Kapasitif Untuk Penentuan Level Aquades', *Rekayasa Energi Manufaktur*, vol. 1, no. 2, p. 9, 2016, doi: 10.21070/r.e.m.v1i2.583.
- [22] F. Ningsih, F. Fitrianingsih, and L. A. Didik, 'Analisis Pengaruh Lama Penggerusan Terhadap Resistivitas Dan Konstanta Dielektrik Pada Pasir Besi Yang Disintesis Dari Kabupaten Bima', *Indones. Phys. Rev.*, vol. 2, no. 3, pp. 92–98, 2019, doi: 10.29303/ipr.v2i3.31.
- [23] A. Yusuf, W. Widada, and W. P. Taruno, 'Determine of the Time Constant of Capacitance Applied to Electrical Capacitance Tomography', *2022 Int.*

Conf. Informatics Electr. Electron. ICIEE 2022 - Proc., pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/ICIEE55596.2022.10010084.

- [24] J. Maitre, K. Bouchard, and L. P. Bédard, ‘Computers and Geosciences Mineral grains recognition using computer vision and machine learning’, *Comput. Geosci.*, vol. 130, no. May, pp. 84–93, 2019, doi: 10.1016/j.cageo.2019.05.009.
- [25] W. Wang and L. Wang, ‘An Image Processing Method for Grains Counting’, pp. 181–185, 2012.
- [26] M. Ostadrahimi, S. Farrokhpay, K. Gharibi, A. Dehghani, and M. Aghajanloo, ‘Effects of flotation operational parameters on froth stability and froth recovery’, *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 121, no. 1, pp. 11–20, 2021, doi: 10.17159/2411-9717/1272/2021.
- [27] A. Eskanolou, M. R. Khalesi, M. Abdollahy, and M. H. Chegeni, ‘Interactional effects of bubble size, particle size, and collector dosage on bubble loading in column flotation’, *J. Min. Environ.*, vol. 9, no. 1, pp. 107–116, 2017, doi: 10.22044/jme.2017.5815.1393.
- [28] A. Eskanolou, M. R. Khalesi, M. Abdollahy, and M. H. Chegeni, ‘Interactional effects of bubble size, particle size, and collector dosage on bubble loading in column flotation’, *J. Min. Environ.*, no. September, 2017, doi: 10.22044/jme.2017.5815.1393.
- [29] S. Oediyani, A. Muttaqin, D. Haryono, and R. F. Suwandana, ‘Metallurgical performance of column and mechanical flotation as a rougher circuit in sphalerite ore flotation with %solid and frother dose variation’, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 909, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/909/1/012010.
- [30] R. Soltanpour, M. Irannajad, and F. Nakhaei, ‘Investigation of effective

operating parameters on carrying capacity in column flotation of copper sulfide minerals', *Part. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 6, pp. 677–684, 2019, doi: 10.1080/02726351.2018.1435593.

- [31] A. Uribe-Salas, P. de Lira-Gómez, R. Pérez-Garibay, F. Nava-Alonso, L. Magallanes-Hernández, and C. Lara-Valenzuela, 'Overloading of gas bubbles in column flotation of coarse particles and effect upon recovery', *Int. J. Miner. Process.*, vol. 71, no. 1–4, pp. 167–178, 2003, doi: 10.1016/S0301-7516(03)00036-X.
- [32] D. Haryono, H. Nugraha, M. Al Huda, W. P. Taruno, and S. Harjanto, 'The Effect of Flotation Reagents Addition (MIBC and PAX) on the Relative Permittivity Value Using 2-Electrode Capacitance Sensor', *Procedia Eng.*, vol. 170, pp. 369–372, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.059.