

**PEMANFAATAN SINYAL KAPASITANSI UNTUK
MONITORING PROSES FLOTASI KOLOM
DENGAN VARIASI UKURAN PARTIKEL
DAN DOSIS *FROTHER***

SKRIPSI

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



Oleh:

Kinanti Salma Sastaviana

3334190096

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

2025

LEMBAR PENGESAHAN

PEMANFAATAN SINYAL KAPASITANSI UNTUK MONITORING PROSES FLOTASI KOLOM DENGAN VARIASI UKURAN PARTIKEL DAN DOSIS *FROTHER*

SKRIPSI

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

Disetujui oleh Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.
NIP. 196705302002121001

Pembimbing II



Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si.
NIP. 197905022005012005

LEMBAR PERSETUJUAN

PEMANFAATAN SINYAL KAPASITANSI UNTUK MONITORING PROSES FLOTASI KOLOM DENGAN VARIASI UKURAN PARTIKEL DAN DOSIS *FROTHER*

Disusun dan diajukan oleh:

Kinanti Salma Sastaviana

3334190096

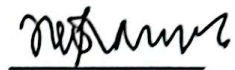
Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 13 Januari 2025

Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

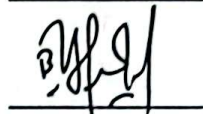
Penguji I

: Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.



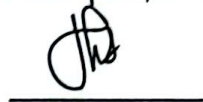
Penguji II

: Bening Nurul Hidayah K., S.T., M.T.



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 sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pemanfaatan Sinyal Kapasitansi untuk *Monitoring* Proses
Flotasi Kolom Dengan Variasi Ukuran Partikel dan Dosis
Frother.
Nama Mahasiswa : Kinanti Salma Sastaviana
NIM : 3334190096
Fakultas : Teknik Metalurgi

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi di atas adalah benar-benar hasil karya saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan oleh rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagai 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 pernyataan ini.

Cilegon, 13 Januari 2025

A colorful postage stamp is visible in the background of the signature. It features a cartoon character on the left, a central emblem, and the text 'METRAL TPA PAU' and '17AMX233602443' at the bottom.

Kinanti Salma Sastaviana

NIM. 3334190096

ABSTRAK

Flotasi adalah proses pemisahan mineral berharga berdasarkan sifat permukaan mineral, yaitu *hydrophobic* dan *hydrophilic*. Dalam flotasi, efisiensi sangat penting dan dapat ditentukan dari performa metalurgis, yaitu *recovery*, sehingga proses flotasi perlu dimonitor dengan baik. Saat ini, teknologi *Machine Vision* digunakan untuk memonitor proses flotasi di industri, namun teknologi ini hanya dapat memonitor di sumbu-x dan sumbu-y, sehingga kurang representatif karena pemisahan mineral terjadi di sumbu-z (*collection zone*). Teknologi sensor berbasis kapasitansi listrik memanfaatkan perbedaan kapasitansi material untuk memonitor flotasi secara *real-time* dan bersifat non-intrusif, sehingga lebih unggul dibandingkan teknologi sebelumnya dalam mengoptimalkan efisiensi proses flotasi kolom. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kapasitansi dan *recovery* flotasi kolom. Kolektor yang digunakan adalah *methyl ester sulfonate*, sedangkan *frother pine oil* divariasikan pada dosis 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm, dan 50 ppm. Variasi ukuran partikel yang digunakan adalah -100+150#, -150+200#, -200+230#, dan -230#, dengan laju alir udara 2,5 L/menit. Pengukuran kapasitansi dilakukan pada kondisi *steady state* (*level 5*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi dosis *frother*, semakin tinggi *recovery* yang diperoleh. Namun, ketika dosis *frother* terlalu tinggi, maka *recovery* akan menurun karena terjadinya *entertainment* non-selektif. Semakin kasar ukuran partikel yang digunakan, maka *recovery* akan semakin menurun. *Recovery* tertinggi mencapai 80,25% dengan kapasitansi 26,91 pF pada dosis *frother* 40 ppm dan ukuran partikel -230#, sedangkan *recovery* terendah adalah 2,17% dengan kapasitansi 24,6 pF pada dosis *frother* 50 ppm dan ukuran partikel -100+150#. Korelasi antara kapasitansi dan *recovery* didapatkan melalui persamaan matematis dari masing-masing variabel. Pada variasi ukuran partikel persamaan matematis yang didapat yaitu $y = -1 \times 10^{-5}x^4 - 0,0019x^3 + 0,0789x^2 - 0,3315x + 0,5651$ dengan polinomial orde 4 di mana $R^2 = 0,9822$. Sementara persamaan matematis yang didapat untuk variasi dosis *frother* adalah $y = -0,0021x^4 + 0,1432x^3 + 3,5862x^2 + 38,674x - 76,742$ dari polinomial orde 4 dengan $R^2 = 0,9827$.

Kata kunci: Sensor Berbasis Kapasitansi, Flotasi Kolom, *Recovery*, Tren.

ABSTRACT

Flotation is a separation process for valuable minerals based on their surface properties, namely hydrophobic and hydrophilic characteristics. In flotation, efficiency is crucial and can be determined through metallurgical performance, specifically recovery; therefore, the flotation process must be carefully monitored. Currently, Machine Vision technology is used to monitor flotation processes in the industry, but this technology only monitors along the x- and y-axes, making it less representative since mineral separation occurs along the z-axis (collection zone). Electrical capacitance-based sensor technology utilizes the difference in material capacitance to monitor flotation in real-time and in a non-intrusive manner, making it more advantageous than previous technologies in optimizing the efficiency of column flotation processes. This study aims to determine the relationship between capacitance and recovery in column flotation. The collector used is methyl ester sulfonate, while the frother, pine oil, was varied at dosages of 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm, and 50 ppm. The particle size variations used were -100+150#, -150+200#, -200+230#, and -230#, with an airflow rate of 2.5 L/min. Capacitance measurements were taken under steady-state conditions (level 5). The results of the study show that the higher the frother dosage, the higher the recovery obtained. However, when the frother dosage is too high, recovery decreases due to non-selective entrainment. The coarser the particle size used, the lower the recovery achieved. The peak recovery reached 80,25% with a capacitance of 26,91 pF at a frother dosage of 40 ppm and a particle size of -230#, while the lowest recovery was 2.17% with a capacitance of 24,6 pF at a frother dosage of 50 ppm and a particle size of -100+150#. The correlation between capacitance and recovery was obtained through mathematical equations for each variable. For particle size variation, the polynomial equation obtained was $y = -1 \times 10^{-5}x^4 - 0,0019x^3 + 0,0789x^2 - 0,3315x + 0,5651$ with a 4th-order polynomial and an R^2 of 0,9822. Meanwhile, for frother dosage variation, the equation obtained was $y = -0,0021x^4 + 0,1432x^3 + 3,5862x^2 + 38,674x - 76,742$ also a 4th-order polynomial, with an R^2 of 0,9827.

Kata kunci: Sensor Berbasis Kapasitansi, Flotasi Kolom, *Recovery*, Tren

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis sampaikan kepada Allah SWT yang telah memberikan karunia, kesehatan, dan kesempatan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul "Pemanfaatan Sinyal Kapasitansi untuk *Monitoring* Proses Flotasi Kolom dengan Variasi Ukuran Partikel dan Dosis *Frother*." Dalam kesempatan ini Penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Abdul Aziz, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Bapak Dr. Didied Haryono, S.T., M.T., dan Ibu Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan terbaik, juga segala saran dan masukan yang bermanfaat kepada penulis selama proses penelitian hingga sidang skripsi.
3. Keluarga penulis yang sudah selalu mendoakan, mendukung, dan menemani penulis selama menyelesaikan studi.
4. Para dosen terhormat yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan pencerahan selama penulis menempuh pendidikan di Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perkembangan penelitian yang lebih baik. semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan memberikan kontribusi terhadap perkembangan ilmu pengetahuan.

Cilegon, 2 Januari 2025

Kinanti Salma Sastaviana

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pasir Kuarsa	6
2.2 Silikon Karbida	6
2.3 Flotasi.....	7
2.4 Flotasi Kolom.....	9
2.5 Kolektor.....	11
2.6 <i>Frother</i>	12
2.7 Kapasitor	14

2.8	Kapasitansi	15
2.9	Kapasitometer	16
2.10	Sensor Kapasitif	17
2.11	<i>Grain Counting</i>	17
2.12	ImageJ	18

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	20
3.2	Alat dan Bahan	21
3.2.1	Alat-alat yang digunakan	21
3.2.2	Bahan-bahan yang digunakan	22
3.3	Prosedur Penelitian	23
3.3.1	Preparasi Sampel	23
3.3.2	Preparasi Sensor Flotasi	23
3.3.3	Proses <i>Monitoring</i> dan Flotasi Kolom	24
3.3.4	<i>Coning and Quartering</i>	27
3.3.5	<i>Grain Counting</i>	28

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Karakterisasi SiC	30
4.2	<i>Grain Counting</i>	31
4.3	Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap <i>Recovery</i> dan Kapasitansi	33
4.4	Pengaruh Dosis <i>Frother</i> Terhadap <i>Recovery</i> dan Kapasitansi	36

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	41
5.2	Saran	42

DAFTAR PUSTAKA	43
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN A	46
A.1 Hasil Karakterisasi SiC	47
A.2 Hasil Flotasi Kolom	47
A.3 Hasil <i>Monitoring</i> Kapasitansi dari Kapasitometer CAP 3201 2CH C-Tech Edwar Labs Technology	61
A.4 <i>Grain Counting</i>	69
LAMPIRAN B	105
B.1 Perhitungan Kadar <i>Feed</i>	106
B.2 Perhitungan Porsen Solid	106
B.3 Perhitungan Dosis <i>Frother</i>	107
B.4 Perhitungan Dosis Kolektor	107
B.5 Perhitungan Kadar Konsentrat	108
B.6 Perhitungan <i>Recovery</i> dan Kumulatif <i>Recovery</i>	112
LAMPIRAN C	119
C.1 Analisis <i>Grain Counting</i> Menggunakan ImageJ 1.53t	120
LAMPIRAN D	125
D.1 Analisis Pola XRD Menggunakan Profex 5.2.5	126
LAMPIRAN E	130
E.1 Gambar Alat	131
E.2 Gambar Bahan	133

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri pertambangan di Indonesia terus menunjukkan pertumbuhan signifikan, seiring dengan peningkatan produksi berbagai komoditas tambang. Berdasarkan data Kementerian ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral), realisasi produksi batu bara pada tahun 2023 mencapai 775,2 juta ton, atau 112% dari target yang ditetapkan. Peningkatan ini sejalan dengan peningkatan investasi di sektor pertambangan yang mencapai USD 7,46 miliar, atau 96,8% dari target tahun tersebut. Investasi besar ini tidak hanya mendorong peningkatan produksi. Selain peningkatan produksi, pemanfaatan teknologi dalam sektor pertambangan menjadi faktor penting untuk menjaga efisiensi dan produktivitas di tengah tingginya permintaan komoditas tambang. Penggunaan teknologi di sektor pertambangan, salah satunya dalam bidang produksi, hingga pengolahan, semakin diperlukan untuk menghadapi tantangan peningkatan produksi dan memenuhi target yang semakin tinggi. Salah satu teknologi yang sangat berperan penting dalam mengolah produk tambang adalah teknologi flotasi kolom.

Flotasi merupakan salah satu teknik konsentrasi yang memanfaatkan perbedaan sifat permukaan mineral untuk memisahkan mineral berharga dari pengotornya. Sifat permukaan ini didasari oleh respon permukaan mineral ketika berinteraksi dengan air, di mana ada dua jenis, yaitu *hydrophobic* (mineral yang

tidak menyukai air) dan *hydrophilic* (mineral yang menyukai air). Mekanisme flotasi kolom dilakukan dengan memasukkan bijih (*feed*) dari *feeder*, lalu udara diinjeksikan melalui *sparger* dari dasar kolom dengan laju tertentu. Ini menciptakan aliran berlawanan (*counter-current*) antara partikel dan gelembung, di mana partikel *hydrophobic* akan menempel pada gelembung dan ikut terangkat ke permukaan sebagai konsentrat, sementara partikel *hydrophilic* akan mengendap sebagai *tailing*. Dalam flotasi, efisiensi merupakan hal yang penting, di mana efisiensi ini dapat dilihat dari performa metalurgisnya yaitu *recovery*.

Karena efisiensi flotasi merupakan hal yang krusial, diperlukan teknologi yang dapat memonitor jalannya proses flotasi agar tetap terkontrol dan efisiensi proses flotasi tetap terjaga. Teknologi yang saat ini umum digunakan di industri adalah *Machine Vision*. Namun, teknologi ini kurang representatif karena hanya dapat memonitor dari sumbu-x dan sumbu-y, sedangkan proses pemisahan berlangsung di sumbu-z. Kekurangan ini mendorong pengembangan teknologi sensor berbasis kapasitansi listrik. Sensor ini mampu memonitor secara *real-time* dan bersifat non-intrusif yang berarti tidak mengganggu proses berjalan, sehingga dapat digunakan untuk memonitor pada *collection zone*. *Monitoring* dalam proses flotasi memiliki peran yang sangat penting karena efisiensi dari proses flotasi dapat diketahui, sehingga dapat mencapai nilai *recovery* yang optimum.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Haryono dkk. (2020) memanfaatkan sistem *Electrical Capacitance Volume Tomography* (ECVT) untuk memonitor proses flotasi dengan menghasilkan citra warna yang merepresentasikan distribusi partikel dan udara dalam kolom flotasi. Penelitian ini berhasil

menunjukkan hubungan antara *recovery* dengan citra yang dihasilkan dari variasi penelitian yang digunakan, yaitu dosis *frother* dan kolektor. Meskipun begitu, penelitian tersebut belum mengaitkan kapasitansi secara mendalam dengan bentuk kurva *recovery* flotasi kolom, dan bagaimana sinyal kapasitansi dapat digunakan untuk memprediksi *recovery*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan *monitoring* proses flotasi kolom dengan menggunakan material silikon karbida (SiC) dan sensor kapasitif *2-channel* yang terhubung ke kapasitometer. Data yang diperoleh akan diplot dalam bentuk kurva kemudian dilakukan pendekatan untuk memprediksi nilai *recovery* berdasarkan kapasitansi.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, beberapa identifikasi masalah yang timbul dalam penelitian ini meliputi:

1. Pengaruh variasi ukuran partikel dan dosis *frother* terhadap nilai *recovery* dan kapasitansi dalam proses flotasi kolom.
2. Hubungan dari kurva nilai kapasitansi dengan *recovery* yang didapat.
3. Pendekatan matematis yang digunakan untuk memprediksi nilai *recovery* berdasarkan kapasitansi yang diperoleh.

1.3 Tujuan Penelitian

Setelah mendapatkan permasalahan yang ada, maka tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Menganalisis bagaimana variasi ukuran partikel dan dosis *frother* mempengaruhi nilai *recovery* dan kapasitasansi dalam proses flotasi kolom.
2. Mengetahui hubungan *recovery* dengan kapasitasansi berdasarkan kurva *monitoring*.
3. Mengetahui pendekatan matematis dari masing-masing variabel untuk memprediksi nilai *recovery* berdasarkan perolehan kapasitasansi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yang dibutuhkan untuk mengarahkan fokus penelitian dengan jelas dan spesifik sebagai berikut:

1. Bijih yang digunakan pada penelitian ini berupa bijih silikon karbida sintesis sebagai partikel *hydrophobic* dan pasir silika sebagai partikel *hydrophilic*.
2. Proses preparasi material, proses flotasi, dan proses *grain counting* dilakukan di Laboratorium *Advanced Materials and Tomography*, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Variasi yang digunakan pada penelitian ini meliputi ukuran partikel yaitu -100+150#, -150+200#, -200+230#, dan -230#, serta dosis *pine oil* sebagai *frother* yaitu 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm, dan 50 ppm.
4. Flotasi kolom dilakukan dengan kolom yang telah dipasangkan dengan sensor kapasitasansi 32-*channel*, dan terdapat 8 level di *collection zone*.

5. Parameter tetap pada penelitian ini meliputi waktu *conditioning* selama 10 menit, dosis kolektor (*methyl ester sulfonate*) 40 ppm, persentase solid 20%, dan laju alir 2,5 L/m.
6. Analisis kadar dilakukan dengan metode *grain counting* dan perhitungan butir dilakukan dengan *software* ImageJ 1.53t.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terbagi menjadi lima bab yang masing-masing memiliki fokus dan tujuan tersendiri. Bab I dalam skripsi ini terdiri dari latar belakang penelitian, identifikasi masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab II menyajikan tinjauan pustaka yang mencakup teori-teori yang mendasari penelitian ini. Bab III menjelaskan metode penelitian yang mencakup diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta prosedur yang diikuti untuk mendapatkan data. Bab IV berisi tentang analisis dan pembahasan data yang diperoleh selama penelitian. Bab V yang merupakan kesimpulan dan saran. Terakhir, merupakan lampiran-lampiran penunjang seperti perhitungan, serta dokumentasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prayogo, T., & Budiman, B. (2009). Survei potensi pasir kuarsa di daerah Ketapang, Propinsi Kalimantan Barat. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 11(2), hal. 126–132.
- [2] Shcherban, N. D. (2017). Review on synthesis, structure, physical and chemical properties and functional characteristics of porous silicon carbide. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 50, hal. 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.02.002>
- [3] Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier Science & Technology Books.
- [4] Wills, B. A. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (7th ed.). Elsevier Science & Technology Books.
- [5] Reddy, P. S. R., Kumar, S. G., Bhattacharya, K. K., Sastri, S. R. S., & Narasimhan, K. S. (1988). *International Journal of Mineral Processing*, 24, 161.
- [6] Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2005). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier Science and Technology Books.
- [7] Finch, J. A., & Dobby, G. S. (1990). *Column Flotation* (1st ed.). Oxford: Pergamon Press, United Kingdom.
- [8] Sastri, S. R. S. (1998). *Column flotation: Theory and practice. Froth Flotation: Recent Trends*, hal. 44–63.
- [9] Laskowski, J.S. (1998) *Frothers and Flotation*. In: Laskowski, J.S. and Woodburn, E.T., Eds., *Frothing in Flotation II*, Ch. 1, CRC Press, Boca Raton, 1-49.
- [10] Glembotskii, V. A., Bogdanova, I. P. (1971) Effect of microporosity on the flotation properties of martite. *Soviet Mining Science*, 7 (1) 93-95 doi:10.1007/bf02501229
- [11] Lin, D., & Somasundaran, P. (1994). Role of collector and frother and hydrophobicity/oleophilicity of pyrite on the separation of pyrite from coal by flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 4, 227–238.

- [12] Klimpel, R., & Isherwood, S. (1991). Some industrial implications of changing frother chemical structure. *International Journal of Mineral Processing*, 33, 369–381.
- [13] Abdullah, M. (2017). *Fisika Dasar II*. ITB, hal. 162–184.
- [14] R. Setiawan, M. Rivai, dan Suwito (2017), "Implementasi Analog Front End pada Sensor Kapasitif untuk Pengaturan Kelembaban Menggunakan Mikrokontroler STM32," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 1, ISSN: 2337-3539.
- [15] Basri, I. Y., & Irfan, D. (2018). *Komponen Elektronika*. Padang, Indonesia: Sukabina Press.
- [16] Samosir, A. S. (2016). Implementasi alat ukur kapasitansi digital (digital capacitance meter) berbasis mikrokontroler. *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 10(1).
- [17] Ctech-Labs, Edwar Technology Co., Ltd, User Guide For Engineer Capacitometer Model Cap3201 2CH High Speed 1000 frames/s, 12 Mar. 2015. [Online]. <http://www.c-techlabs.com>. [Diakses: Januari. 21, 2025].
- [18] Smith, P., & Brown, J. (2015). Capacitive sensors for measuring physical quantities: Applications and limitations. *Sensors Journal*, 8(2), hal. 34–45.
- [19] Zhang, J., Liu, S., Wu, W., Zhong, X., & Liu, T. (2022). Research on a rapid identification method for counting universal grain crops. *PLoS ONE*, 17(9), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273785>
- [20] C. T. Rueden, J. Schindelin, M. C. Hiner, et al., "ImageJ2: ImageJ untuk data citra ilmiah generasi berikutnya," *BMC Bioinformatics*, vol. 18, no. 1, p. 529, 2017. doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z
- [21] Laskowski, J. S., Cho, Y. S., & Ding, K. (2003). Effect of frothers on bubble size and foam stability in potash ore flotation systems. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81, hal. 63–69.
- [22] Azhari, & Aziz, M. (2016). Sintesis dan karakterisasi material berpori berbasis mineral silika Pulau Belitung. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batu Bara*, 12(3), hal. 161–170.
- [23] Budavari, S. (1989). *Merck Index of Chemicals and Biologicals* (11th ed.). USA: Merck & Company, Incorporated, hal. 1182.
- [24] Drzymala, J. (2007). *Mineral processing: Foundations of theory and practice in minerallurgy*. Wroclaw: Wroclaw University of Technology, hal. 5082.

- [25] Fuerstenau, M. C., & Somasundaran, S. (2003). Principles of Mineral Processing. Littleton, CO, USA: SME, hal. 245–306.
- [26] Göktepe, F. (2002). Effect of pH on pulp potential and sulphide mineral flotation. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 26, 309.
- [27] Haryono, D., Darmabakti, I., Oediyani, S., & Harjanto, S. (2020). Monitoring of column flotation process in collection zone using ECVT with the effect of collector and frother doses to recovery. *MESIN*, 11(1), 1–7.
- [28] Haryono, D., Harjanto, S., Wijaya, R., Oediyani, S., Nugraha, H., Huda, M. A., & Taruno, W. P. (2018). Investigation of column flotation process on sulphide ore using 2-electrode capacitance sensor: The effect of air flow rate and solid percentage. *AIP Conference Proceedings*, 1945, 1–5. doi.org/10.1063/1.5030267
- [29] Haryono, D., Harjanto, S., Rahmandani, H. F., Oediyani, S., Nugraha, H., & Huda, M. A. (2019). A preliminary study of three-phase column flotation process monitoring using electrical capacitance volume tomography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673(1), 1–6. https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012130
- [30] Munadi, S. (1992). Mengenal tomografi seismik. *LPL*, 3, hal. 239–248. Lemigas.
- [31] Ran, J., Qiu, X., Hu, Z., Liu, Q., Song, B., & Yao, Y. (2019). Effects of particle size on flotation performance in the separation of copper, gold and lead. *Powder Technology*, 344, hal. 654–664.
- [32] Warsito, S. (2005). Review: Komputasi tomografi dan aplikasinya dalam proses industri.
- [33] Wills, B. A. (1982). *Mineral Processing Technology* (4th ed.). Pergamon Press.
- [34] Yoon, R. H., & Luttrell, G. H. (1989). Pengaruh ukuran gelembung pada flotasi partikel halus. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5(1–4), hal. 101–122.
- [35] Zhou, S., Yuan, Z., Cheng, Q., & et al. (2020). Quantitative analysis of iron and silicon concentrations in iron ore concentrate using portable X-ray fluorescence (XRF). *Applied Spectroscopy*, 74(1), 55–62. doi.org/10.1177/0003702819871627.