



ISSN 3032-2022
Volume 1 Nomor 1, Januari 2024

Applied Geo-mining and Metallurgy

The Journal of Integrated Applied Geoscience, Mining, and Metallurgy



Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

Applied Geo-Mining and Metallurgy
Volume 1 Nomor 1, Januari 2024

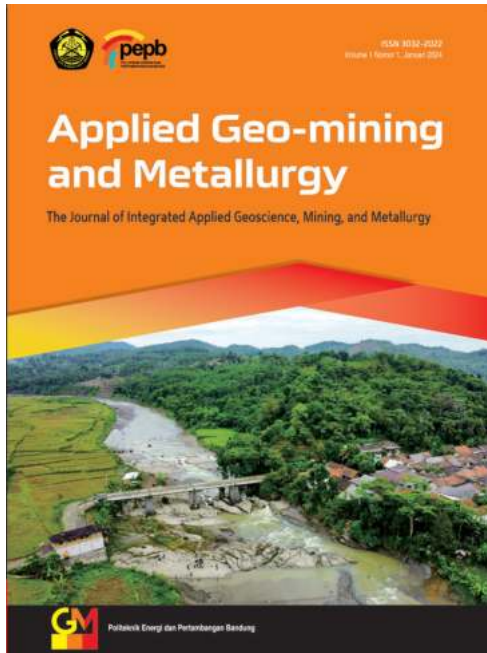


Foto Cover

Lokasi ekskursi lapangan mahasiswa PEP Bandung, Sungai Cipamingkis Bogor.

Desain Grafis

Ayi R. Sacadipura, S.Pd.

Alamat Sekretariat dan Pengiriman Naskah:

Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung (PEP-B),
Jalan Jend. Sudirman No. 623 Bandung
40211

Penanggung Jawab

Dr. Asep Rohman

Ketua Dewan Redaksi/Editor in Chief:

Dr. forest. Tedi Yunanto

Wakil Ketua Dewan Redaksi/Vice Editor in Chief

Sabtanto Joko Suprpto, M.T.

Editor

Dr. Asep Rohman
Dr. mont. Imelda E.R. Hutabarat
Dr. Priatna
Dr. Asep Bahtiar
Dr. Asep Mohamad Ishaq Shiddiq
Irwan Iskandar, Ph.D
Yudi Rahayudin, Ph.D

Redaktur Pelaksana

Tri Handajani, M.Si
Febriyanto Pratama, S.Kom
Ayu Ratna Wulansari, S.Pd.
Dea Pratami, S.Pd.

Reviewer Jurnal:

1. Dr. Ir. Barlian Dwinagara, M.T., IPU
 2. Dr. Edy Jamal Tuheteru, S.T., M.T.
 3. Dr. Faisal Danu Tuheteru, S.Hut., M.Si.
 4. D.Sc.(Tech) Imam Santoso, S.T., M.Phi.
 5. Dr.Eng. Iwan Setiawan, M.T.
-



Applied Geo-mining and Metallurgy

The Journal of Integrated Applied Geoscience, Mining, and Metallurgy



KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan YME yang telah melimpahkan karunia-Nya sehingga Jurnal *Applied Geo-Mining and Metallurgy* Volume 1 Nomor 1, Januari 2024 dapat hadir di hadapan pembaca. Edisi ini menampilkan lima artikel yang bersumber dari kegiatan penelitian mahasiswa, dosen PEP Bandung dan juga penulis dari luar PEP Bandung. Kelima jurnal tersebut telah melewati proses *review* dan layak untuk dipublikasikan.

Dengan penerbitan jurnal ini, diharapkan dapat memberikan sumbangsih terhadap perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya pada bidang ilmu geologi, pertambangan, dan metalurgi.

Kami berharap, artikel-artikel dalam jurnal ini akan menjadi referensi bermanfaat bagi para pembacanya.

Bandung, Januari 2024

Redaksi Jurnal *Applied Geo-Mining and Metallurgy*



DAFTAR ISI

Volume 1 Nomor 1, Januari 2024

Derajat Lateritisasi dan Pengkayaan Fe-Ni-Co Pada Batuan Harsburgit di Pulau Sebuku Kalimantan Selatan

Degree of Lateritization and Fe-Ni-Co Enrichment in Harsburgite Rocks on Sebuku Island, South Kalimantan

Fasya Zahra Fauziyyah Ramdani..... 1

Evaluasi Kinerja dan Keandalan Teknologi Lidar Sebagai Solusi *Monitoring* Deformasi Massa Batuan pada Tambang Bawah Tanah

Performance Evaluation and Reliability of Lidar Technology As a Solution for Monitoring Rock Mass Deformation in Underground Mines

Ilham Nurhakim..... 17

Optimalisasi Faktor Keamanan Lereng Deterministik dengan Menggunakan *Critical Failure Surface* pada Slide 6.0

Optimalization of Deterministic Safety Factor Using Critical Failure Surface in Slide 6.0

Hifni Satria Muwaffaqi..... 32

Struktur Tegakan dan Tingkat Keberhasilan Area Reklamasi pada Tambang Silika

Stand Structure and Success Level of Reclamation Areas at Silica Mines

Tedi Yunanto, Dadan Wildan 51

**Analisis Nilai Keekonomian Teknik Peningkatan Oksigen Terlarut
Terhadap Ekstraksi Emas dan Perak serta Konsumsi Sianida**

*Analysis the Economic Value of Dissolved Oxygen Enhancement Technique
for Gold and Silver Extraction and Sodium Cyanide Consumption*

Dikri Fajar Ramadhan, Imelda Eva Roturena Hutabarat,

Denny Lumban Raja, Sulaeman 74

Pedoman penulisan artikel/makalah dalam jurnal “Applied geo-mining and metallurgy”
Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, KESDM..... 92



Derajat Lateritisasi dan Pengkayaan Fe-Ni-Co Pada Batuan Harsburgit di Pulau Sebuku Kalimantan Selatan

Degree of Lateritization and Fe-Ni-Co Enrichment in Harsburgite Rocks on Sebuku Island, South Kalimantan

Fasya Zahra Fauziyyah Ramdani¹

¹Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

Email: Fasyaswork@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci:

harsburgit, derajat lateritisasi, limonit, saprolit, Fe-Ni-Co.

Iklim tropis di Indonesia menyebabkan tingginya tingkat pelapukan kimiawi atau lateritisasi pada batuan ultrabasa menghasilkan pengkayaan unsur-unsur logam ekonomis diantaranya Fe, Ni, dan Co yang terakumulasi pada zona limonit maupun saprolit. Penelitian ini dilakukan di Pulau Sebuku yang didominasi oleh batuan ultramafik diantaranya adalah harsburgit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh derajat lateritisasi pada zona limonit, saprolit, dan batuan asal terhadap pengkayaan Fe, Ni, dan Co. Sebanyak 95 sampel diambil dari 9 lubang bor dianalisis menggunakan XRF untuk mengetahui unsur utama dan unsur ekonomis. Derajat lateritisasi dihitung dari kandungan SiO_2 dibagi dengan akumulasi total SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 atau S/SAF index menggambarkan intensitas dari reaksi kimia. Nilai terendah dari S/SAF index menunjukkan derajat lateritisasi yang lebih tinggi. Masing-masing zona limonit, saprolite, dan batuan dasar memiliki nilai indeks S/SAF berkisar dari 0,16–0,58 (lateritisasi kuat), 0,27–0,85 (lateritisasi sedang-kaolinisasi), dan

0,77-1,24 (batuan induk). Zona dengan derajat lateritisasi kuat mengandung kadar Fe antara 36-51%, Ni 0,80–1,38%, dan Co 0,07-1,17 %. Harsburgit mengandung kadar Fe 4,86–7,99 %, Ni 0,20-1,76 %, dan Co 0,005-0,015 %. Derajat lateritisasi di zona limonit lebih tinggi dibandingkan dengan zona saprolit dan batuan dasar harsburgit disebabkan oleh dekomposisi dari mineral silika, pembentukan mineral sekunder pembawa besi dan aluminium oksida-hidroksida. Derajat lateritisasi memiliki hubungan positif dengan pengkayaan Fe dan Co, tetapi tidak berkorelasi terhadap pengkayaan Ni.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

harzburgite, degree of lateritization, limonite, saprolite, Fe-Ni-Co

The tropical climate in Indonesia causes a high level of chemical weathering or lateritization of ultramafic rocks, which results in the enrichment of economic elements such as Fe, Ni, and Co. These elements accumulate in the limonite and saprolite zones. This research was conducted on Sebuku Island, which is composed of ultramafic rocks, especially harzburgite. This study aims to determine the effect of the degree of lateritization in the limonite, saprolite, and bedrock zones on the enrichment of economic elements. A number of 95 samples were collected from 9 drill holes and analyzed using XRF to determine the main and economic elements. The degree of lateritization is calculated from the SiO_2 content divided by the total accumulation of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 resulting in the S/SAF index which describes the intensity of the chemical reaction. The lowest value of the S/SAF index, indicates a higher degree of lateritization. Each limonite, saprolite, and bedrock zone has S/SAF index values ranging from 0.16–0.58 (strong lateritization), 0.27-0.85 (medium lateritization-kaolinization), and 0.77-1.24 (mother rock). The zone with a strong degree of lateritization contains Fe levels between 36-51%, Ni 0.80-1.38%, and Co 0.07-1.17%. The bedrock contains 4.86–7.99% Fe, 0.20-1.76% Ni, and 0.005-0.015% Co. The degree of lateritization in the limonite zone is

higher than in the saprolite and bedrock zones. The decomposition of silica minerals causes this to form the iron and aluminum oxide-hydroxide bearing minerals. The degree of lateritization has a positively correlates with the enrichment of Fe and Co. However, the distribution of high Ni is not correlated with the index of lateritization.

1. PENDAHULUAN

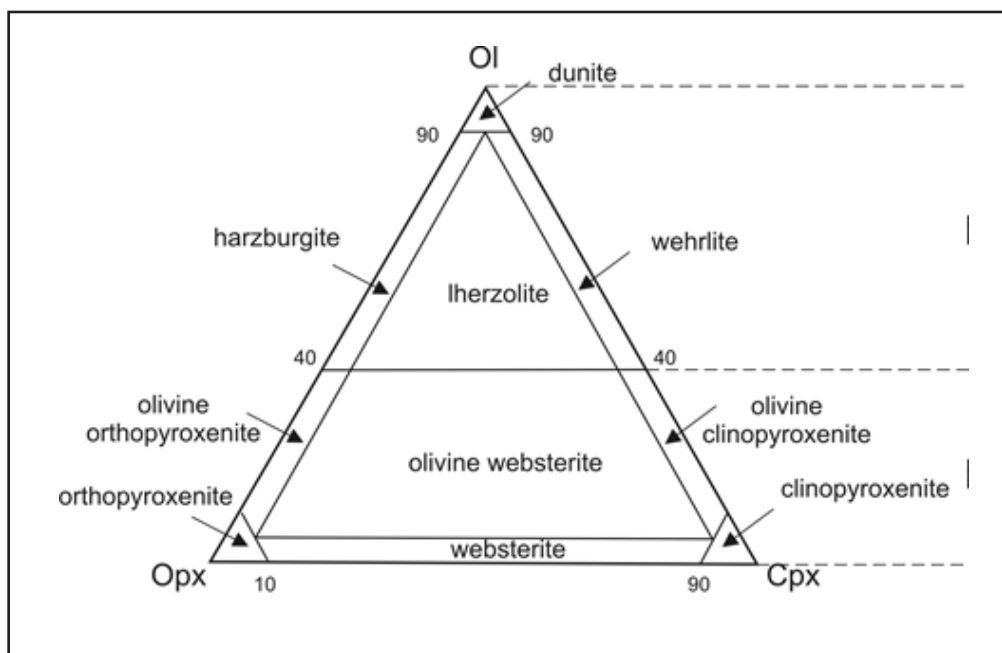
Proses lateritisasi merupakan suatu proses pelapukan mekanis dan pelapukan kimiawi yang berjalan bersama secara pervasif pada batuan asal. Proses pelapukan tersebut terjadi dalam kondisi iklim tropis sampai sub-tropis yang lembab pada masa lampau ataupun saat ini (Robb, 2005; Marsh dr, 2013; Butt & Cluzel, 2013). Proses rombakan, hidrasi, hidrolisis dan oksidasi menyebabkan ubahan pada komposisi batuan asal dan membentuk regolith yang cukup tebal dengan karakteristik tertentu (Robb, 2005). Proses lateritisasi terhadap batuan asal ultrabasa akan mengakibatkan pengkayaan beberapa unsur ekonomis seperti besi (Fe), nikel (Ni), dan kobal (Co).

Batuan ultrabasa merupakan bagian utama dari kerak samudera yang bila tersingkap di permukaan dikenal sebagai kompleks ofiolit. Batuan ini disusun oleh lebih dari 90% mineral-mineral mafik, yaitu mineral dengan komposisi unsur magnesium (Mg) dan besi (Fe) berupa olivin, ortopiroksin, klinopiroksin,

dan hornblende. **Gambar 1** menunjukkan klasifikasi batuan ultrabasa berdasar komposisi olivin, ortopiroksin, dan klinopiroksin (Streickeisen, 1973). Batuan ultrabasa yang mengalami metamorfosa akan membentuk batuan serpentinit.

Lateritisasi pada batuan ultrabasa pada umumnya menghasilkan profil bijih dari bagian bawah setelah batuan dasar berupa saprolit dan limonit yang pada bagian atasnya ditutupi *fericrete* (Robb, 2005; Marsh dr., 2013).

Lokasi penelitian Banjar Asri Utara berada di Pulau Sebuku yang merupakan kompleks ofiolit yang mengandung batuan ultrabasa sebagai salah satu batuan penyusunnya (**Gambar 2**). Neraca sumber daya mineral PSDMBP pada tahun 2022 menunjukkan bahwa cadangan bijih besi laterit di daerah Kalimantan Selatan memiliki sumber daya sebesar 585 juta wmt dan cadangan sebesar 444 juta wmt (PSDMBP, 2022). Secara administratif berada di dalam wilayah Kecamatan Pulau Sebuku, Kabupaten Kotabaru, Provinsi Kalimantan



Gambar 1. Klasifikasi batuan ultrabasa berdasarkan (Streckeisen, 1973). Batuan ultrabasa dengan komposisi olivin dibawah 40% dikelompokkan sebagai piroksenit, dan yang >40% dikelompokkan sebagai peridotite. Ol = olivine, Opx= ortopyroksin, Cpx= clinopyroksin.

Selatan dan masuk dalam area Izin Usaha Pertambangan PT Sebuku Iron Lateritic Ores (PT SILO).

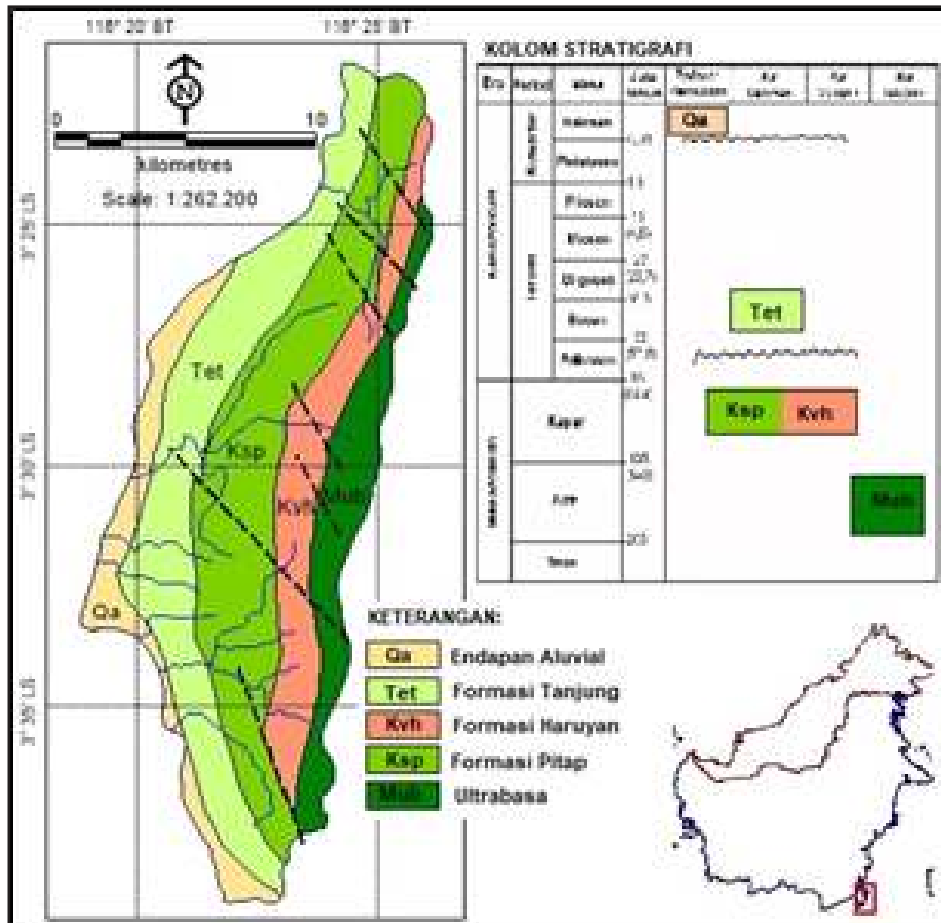
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi pengaruh dari derajat lateritisasi pada batuan ultrabasa daerah penelitian dengan pengkayaan beberapa unsur ekonomis yang terkandung di dalamnya. Dengan mengetahui derajat lateritisasi kita dapat mengetahui kandungan besi yang terkandung pada zona limonit, karena semakin tinggi derajat lateritisasi artinya proses pencucian atau pemisahan antara mineral *mobile* dan *immobile* akan semakin baik. Sehingga dalam proses penambangan dan

pengolahan akan meningkatkan produktivitas secara signifikan, hal ini disebabkan karena endapan laterit tersebut telah melalui proses pelapukan yang terjadi secara terus-menerus.

2. GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Berdasarkan peta geologi regional lembar Kotabaru (Rustandi, drr, 1995), Pulau Sebuku tersusun oleh empat satuan/ formasi batuan dengan urutan stratigrafi dari tua ke muda adalah satuan batuan ultrabasa, Formasi Pitab, Formasi Haruyan, dan Formasi Tanjung serta endapan aluvial (**Gambar 2**).

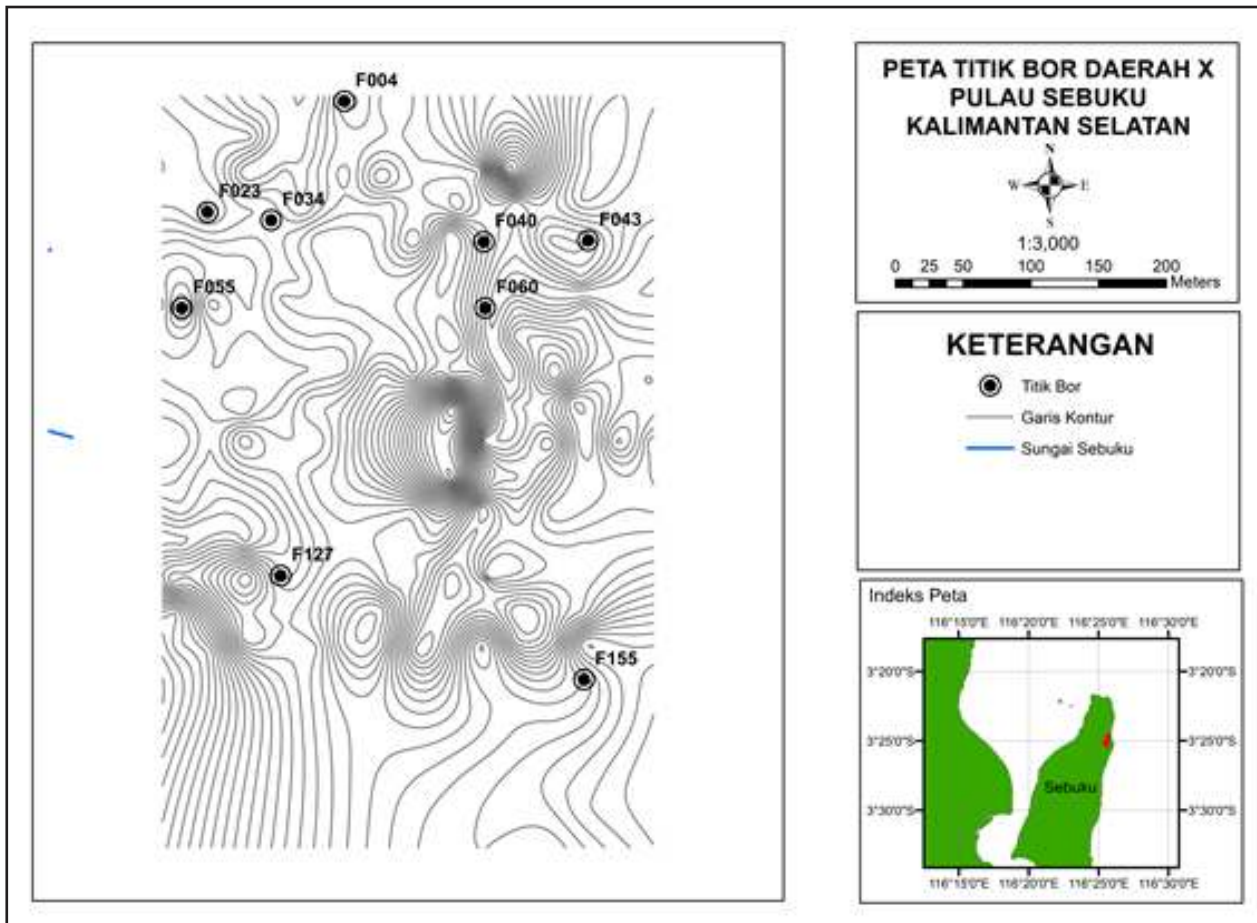
Satuan batuan ultrabasa (Mub) merupakan batuan dasar berumur Jura yang diperkirakan



Gambar 2. Peta lokasi dan geologi regional daerah penelitian.(Rustandi drr., 1995).



Gambar 3. Profil laterit di daerah penelitian.



Gambar 4. Peta lokasi pemboran daerah penelitian

bagian dari kerak samudra yang terdiri dari lerzolit, harsburgit, dunit, gabro, basal, dan serpentinit yang umumnya telah terserpentinkan. Formasi Pitap (Ksp) berumur Kapur yang terdiri dari perselingan batupasir, batulanau, konglomerat dengan sisipan batugamping dan breksi aneka bahan.

Formasi Haruyan (Kvh) terdiri dari lava basal, breksi gunungapi dan tufa, formasi ini yang secara horizontal menjemari dengan Formasi Pitap. Formasi Tanjung (Tet), berumur Eosen merupakan perselingan antara

konglomerat, batupasir, batulanau dengan sisipan serpih, dan batubara dan batugamping, secara tidak selaras menutup Formasi Pitap.

Endapan aluvial (Qa) terdiri dari aluvial sungai, endapan rawa, dan endapan pantai yang merupakan endapan permukaan yang menempati dataran pantai dan sepanjang sungai berupa endapan pasir dan lumpur. Struktur geologi yang berkembang di daerah ini yang berkembang adalah sesar dengan arah umum sebarannya barat laut–tenggara.

Seperti halnya endapan laterit pada

umumnya, profil laterit di daerah penelitian dipisahkan menjadi 3 zona yaitu zona utama yaitu saprolite, limonit, dan *fericrete* (**Gambar 3**). Secara detil zona saprolit dibedakan menjadi *hard saprolite*, *rocky saprolite*, *saprolite*, dan *earthy saprolite*. Zona limonit bisa dipisahkan menjadi 2 yaitu limonit kuning dan limonit merah.

3. SAMPEL DAN METODE PENELITIAN

Pemboran dilakukan pada 9 titik dengan variasi kedalaman. Sebanyak 95 sampel inti bor diambil dari batuan dasar, zona saprolit, dan zona limonite masing-masing sebanyak 35, 33, dan 27 sampel. Analisis geokimia dengan metode X-Ray *Fluorescence* (XRF) dilakukan menggunakan alat S8 Tiger Bruker di Laboratorium PT SILO, Sebuku. Satu sampel

batuan dasar dilakukan analisis petrografi menggunakan Stereomikroskop Binokuler Carl Zeiss V-20 di Laboratorium Politeknik Energi dan Pertambangan, Bandung.

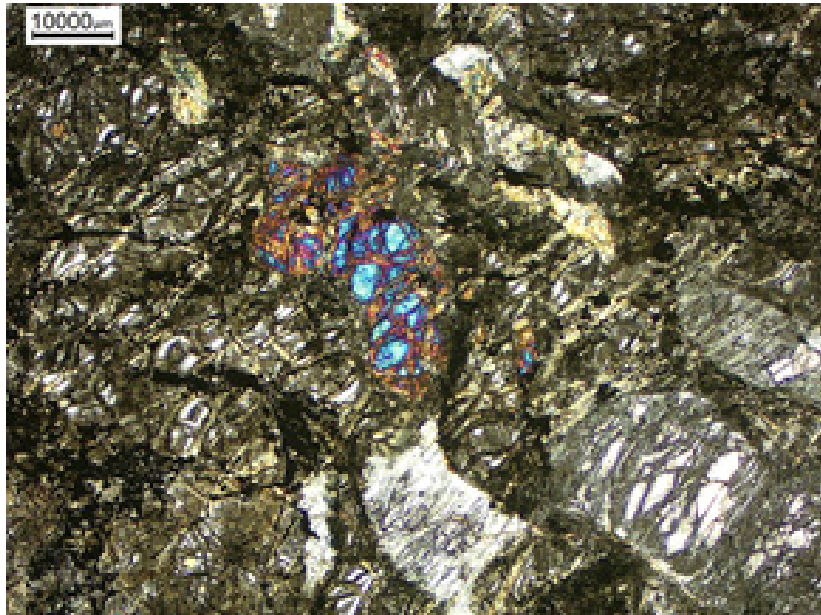
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Petrografi

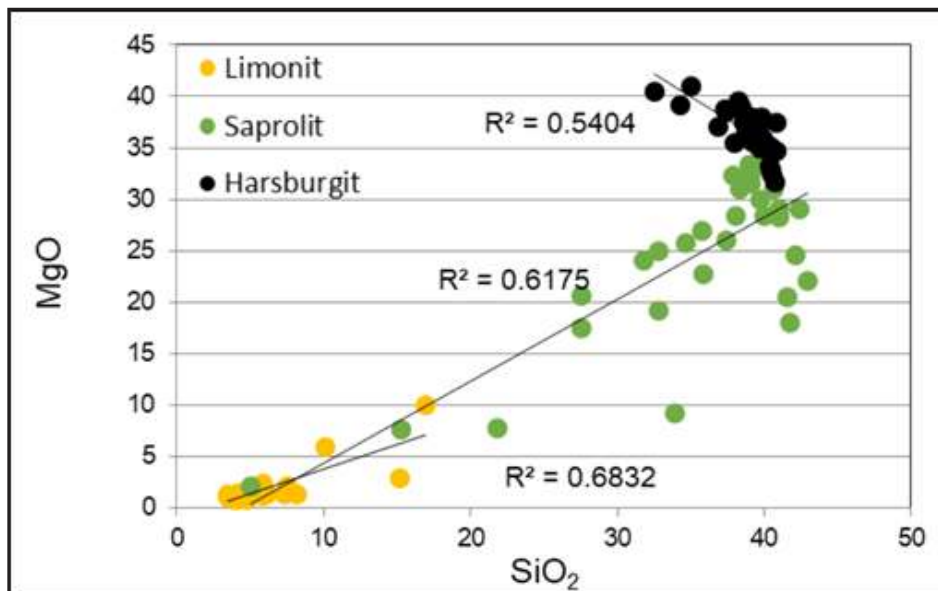
Singkapan batuan dasar ultrabasa secara intensif terpotong oleh sesar dan rekahan sehingga mempercepat proses pelapukan karena resapan air dan oksidasi (**Gambar 4**). Analisis petrografi batuan asal dari inti pemboran menunjukkan batuan harsburgit yang sudah mengalami serpentinisasi kuat (**Gambar 5**). Batuan memiliki tekstur holokristalin, porfiritik dengan bentuk butir anhedral–sub hedral. Mineral penyusun batuan adalah olivin, klinopiroksen, ortopiroksen, antigorite, lizardit,



Gambar 5. Singkapan harsburgit di lokasi penelitian



Gambar 6. Fotomikrografi harsburgit



Gambar 7. Perbandingan MgO vs SiO₂

Tabel 1. Hasil analisis XRF unsur-unsur utama (dalam %) dan perhitungan derajat lateritisasi.

| Titik Bor | Zona | Kedalaman (m) | FeO | NI0 | AL2O3 | P2O5 | SiO2 | MgO | Cr2O3 | MnO | CaO | Na2O | K2O | TiO2 | SO2 | Fe2O3 | Fe | Ni | Co | SAF | S/SAF | MgO/SiO2 |
|-----------|------------|---------------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|----------|
| CB005 | Limonit | 0 - 1 | 63.55 | 1.06 | 7.56 | 0.11 | 4.11 | 0.85 | 3.09 | 0.71 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 72.12 | 49.39 | 0.83 | 0.07 | 83.79 | 0.05 | 0.21 |
| | | 1 - 2.0 | 62.10 | 1.28 | 3.99 | 0.09 | 5.41 | 1.76 | 3.12 | 1.03 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.19 | 0.01 | 70.48 | 48.27 | 1.01 | 0.10 | 79.89 | 0.07 | 0.32 |
| | Saprolit | 2 - 2.4 | 30.39 | 1.03 | 4.83 | 0.03 | 27.51 | 20.70 | 1.62 | 0.51 | 0.16 | 0.04 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 59.67 | 23.62 | 0.81 | 0.05 | 92.00 | 0.30 | 0.75 |
| CB016 | Limonit | 0 - 1 | 64.93 | 1.25 | 6.03 | 0.12 | 3.90 | 0.88 | 3.37 | 0.88 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.16 | 0.01 | 73.69 | 50.47 | 0.98 | 0.10 | 83.63 | 0.05 | 0.22 |
| | | 1 - 1.5 | 64.75 | 1.49 | 6.31 | 0.09 | 4.08 | 1.07 | 2.30 | 0.99 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.16 | 0.01 | 73.49 | 50.33 | 1.17 | 0.11 | 83.87 | 0.05 | 0.26 |
| | Saprolit | 1.5 - 2 | 11.70 | 1.58 | 0.87 | 0.01 | 39.04 | 32.37 | 0.63 | 0.18 | 0.27 | 0.17 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 13.28 | 9.10 | 1.24 | 0.02 | 53.19 | 0.73 | 0.83 |
| CB089 | Limonit | 0 - 1 | 64.33 | 1.40 | 5.87 | 0.12 | 4.28 | 0.96 | 3.83 | 1.05 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.01 | 73.02 | 50.00 | 1.10 | 0.12 | 83.16 | 0.05 | 0.22 |
| | | 1 - 1.6 | 65.12 | 1.76 | 5.40 | 0.09 | 4.69 | 1.18 | 3.70 | 1.14 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.13 | 0.01 | 73.91 | 50.62 | 1.38 | 0.12 | 84.00 | 0.06 | 0.25 |
| | Harsburgit | 1.6 - 2.6 | 9.15 | 0.92 | 0.60 | 0.01 | 38.69 | 36.25 | 0.39 | 0.14 | 0.17 | 0.19 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 8.35 | 7.11 | 0.72 | 0.01 | 47.64 | 0.81 | 0.94 |
| CB105 | Limonit | 0 - 0.48 | 57.75 | 1.21 | 7.67 | 0.10 | 6.12 | 1.37 | 3.03 | 0.82 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 65.55 | 44.89 | 0.95 | 0.10 | 79.33 | 0.08 | 0.22 |
| | | 0.48 - 1.25 | 61.70 | 1.31 | 8.15 | 0.08 | 4.73 | 0.80 | 3.09 | 1.07 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 70.02 | 47.96 | 1.03 | 0.13 | 82.91 | 0.06 | 0.17 |
| | Saprolit | 1.25 - 2 | 60.87 | 1.68 | 7.08 | 0.05 | 5.90 | 2.43 | 3.28 | 1.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.14 | 0.01 | 69.09 | 47.32 | 1.32 | 0.11 | 82.07 | 0.07 | 0.41 |
| CB113 | Limonit | 2 - 2.3 | 45.21 | 1.77 | 6.44 | 0.03 | 16.95 | 9.99 | 2.93 | 0.77 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.11 | 0.01 | 51.31 | 35.14 | 1.39 | 0.08 | 74.69 | 0.23 | 0.59 |
| | | 2.3 - 2.6 | 54.71 | 1.67 | 6.73 | 0.04 | 10.06 | 5.88 | 3.22 | 0.90 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.13 | 0.01 | 62.10 | 42.53 | 1.31 | 0.09 | 78.89 | 0.13 | 0.58 |
| | Saprolit | 2.6 - 2.81 | 31.61 | 1.69 | 4.83 | 0.01 | 27.51 | 17.50 | 2.03 | 0.50 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 35.88 | 24.57 | 1.33 | 0.05 | 68.22 | 0.40 | 0.64 |
| CB158R | Limonit | 2.81 - 3.2 | 17.84 | 1.48 | 3.38 | 0.01 | 35.73 | 26.92 | 1.12 | 0.27 | 0.11 | 0.11 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 20.24 | 13.86 | 1.16 | 0.03 | 59.36 | 0.60 | 0.75 |
| | | 3.2 - 3.55 | 11.75 | 1.23 | 2.53 | 0.01 | 39.11 | 31.49 | 0.73 | 0.16 | 0.29 | 0.16 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 13.33 | 9.13 | 0.97 | 0.02 | 54.97 | 0.71 | 0.81 |
| | Harsburgit | 3.55 - 3.85 | 15.52 | 1.26 | 2.78 | 0.01 | 38.10 | 28.34 | 0.89 | 0.21 | 0.26 | 0.14 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 17.62 | 12.06 | 0.99 | 0.02 | 58.49 | 0.65 | 0.74 |
| CB123 | Limonit | 3.85 - 4.3 | 9.01 | 0.81 | 1.41 | 0.01 | 40.08 | 34.93 | 0.74 | 0.12 | 0.34 | 0.18 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 10.22 | 7.00 | 0.64 | 0.01 | 51.71 | 0.78 | 0.87 |
| | | 4.3 - 5 | 6.58 | 0.29 | 0.57 | 0.01 | 40.80 | 37.44 | 0.53 | 0.09 | 0.80 | 0.22 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.46 | 5.11 | 0.23 | 0.01 | 48.83 | 0.84 | 0.92 |
| | Saprolit | 5 - 5.5 | 6.93 | 0.26 | 0.59 | 0.01 | 39.18 | 37.97 | 0.55 | 0.10 | 0.87 | 0.19 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.86 | 5.38 | 0.21 | 0.01 | 47.63 | 0.82 | 0.97 |
| CB158R | Limonit | 0 - 1 | 65.21 | 1.23 | 5.77 | 0.12 | 3.91 | 0.80 | 5.64 | 1.01 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.01 | 74.01 | 50.68 | 0.97 | 0.12 | 83.69 | 0.05 | 0.21 |
| | | 1 - 2.0 | 65.50 | 1.45 | 4.75 | 0.06 | 3.48 | 1.34 | 6.23 | 1.24 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.01 | 74.34 | 50.91 | 1.14 | 0.18 | 82.58 | 0.04 | 0.38 |
| | Saprolit | 2 - 2.3 | 64.20 | 1.82 | 3.62 | 0.06 | 5.04 | 2.15 | 5.90 | 1.25 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 72.87 | 49.90 | 1.43 | 0.23 | 81.52 | 0.06 | 0.43 |
| CB158R | Limonit | 2.3 - 3 | 24.01 | 2.44 | 0.90 | 0.01 | 31.79 | 24.07 | 2.46 | 0.38 | 0.00 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 27.25 | 18.66 | 1.91 | 0.06 | 59.95 | 0.53 | 0.76 |
| | | 3 - 3.6 | 20.32 | 2.10 | 0.88 | 0.01 | 34.69 | 25.73 | 2.47 | 0.31 | 0.00 | 0.08 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 23.06 | 15.79 | 1.65 | 0.03 | 58.64 | 0.59 | 0.74 |
| | Saprolit | 3.6 - 4 | 9.49 | 0.65 | 0.38 | 0.01 | 39.18 | 35.60 | 0.65 | 0.13 | 0.00 | 0.18 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 8.66 | 7.38 | 0.51 | 0.01 | 48.21 | 0.81 | 0.91 |
| CB158R | Limonit | 4 - 4.25 | 9.80 | 0.67 | 0.68 | 0.01 | 38.01 | 35.44 | 1.24 | 0.13 | 0.03 | 0.23 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 11.13 | 7.62 | 0.53 | 0.01 | 49.82 | 0.76 | 0.93 |
| | | 4.25 - 4.8 | 9.66 | 0.38 | 0.29 | 0.01 | 36.86 | 37.05 | 0.27 | 0.14 | 0.03 | 0.17 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 10.96 | 7.51 | 0.30 | 0.02 | 48.11 | 0.77 | 1.00 |
| | Harsburgit | 4.8 - 5 | 8.37 | 0.32 | 0.39 | 0.01 | 34.30 | 39.18 | 0.45 | 0.11 | 0.15 | 0.19 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.38 | 6.50 | 0.25 | 0.01 | 42.08 | 0.82 | 1.14 |
| CB158R | Limonit | 5 - 6.0 | 8.38 | 0.30 | 0.64 | 0.01 | 32.53 | 40.46 | 0.80 | 0.11 | 0.26 | 0.19 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 9.51 | 6.51 | 0.23 | 0.01 | 42.67 | 0.76 | 1.24 |

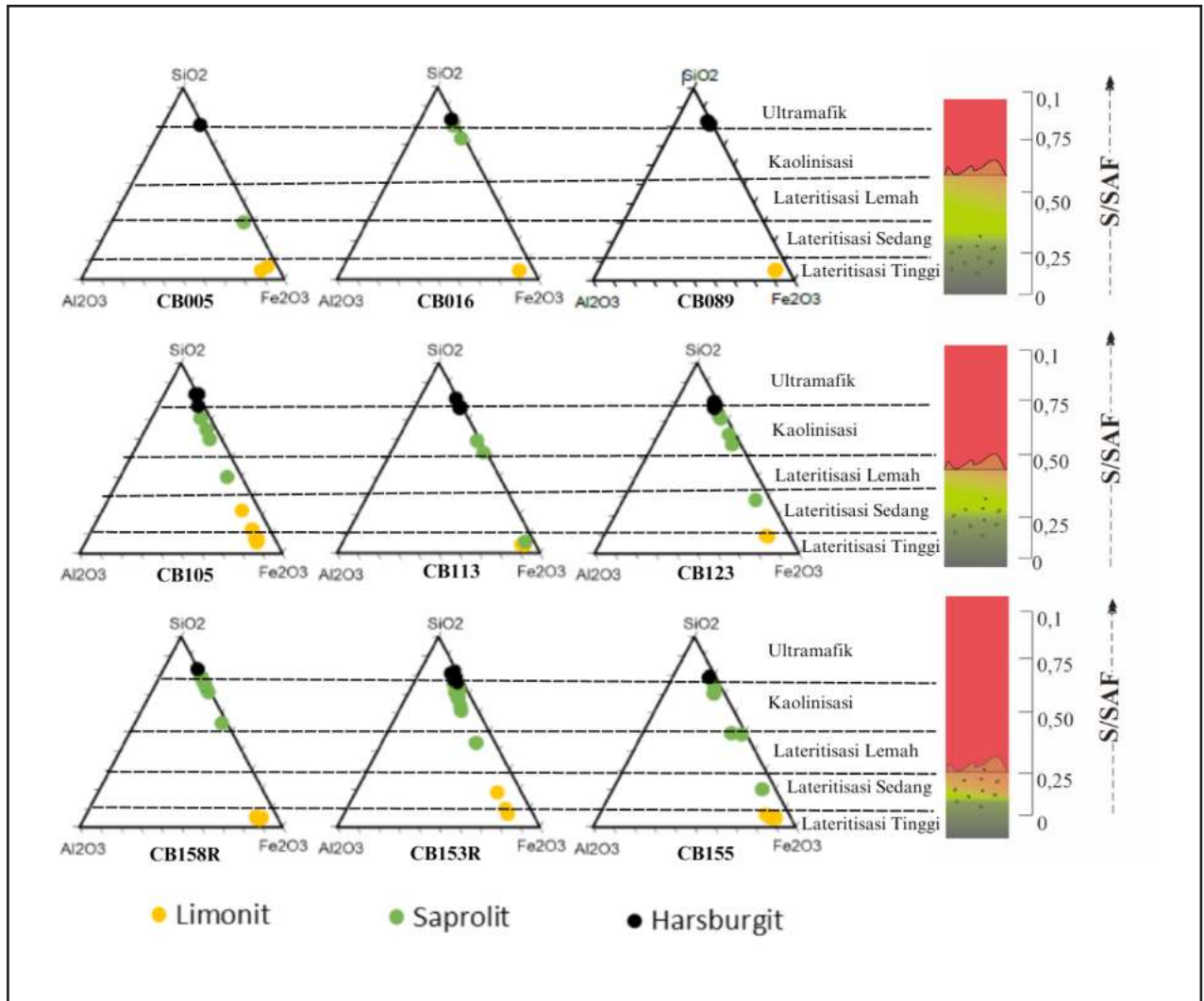
Tabel 1. Lanjutan:

Hasil analisis XRF unsur-unsur utama (dalam %) dan perhitungan derajat lateritisasi.

| Titik Bor | Zona | Kedalaman (m) | FeO | NI0 | AL2O3 | P2O5 | SiO2 | MgO | Cr2O3 | MnO | CaO | Na2O | K2O | TiO2 | SO2 | Fe2O3 | Fe | Ni | Co | SAF | S/SAF | MgO/SiO2 |
|-----------|------------|---------------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|----------|
| CB123 | Limonit | 0 - 1 | 56.82 | 1.20 | 8.61 | 0.10 | 7.29 | 1.35 | 2.96 | 1.22 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 64.49 | 44.17 | 0.94 | 0.12 | 80.40 | 0.09 | 0.19 |
| | | 1 - 1.39 | 57.18 | 1.46 | 9.24 | 0.08 | 7.54 | 2.11 | 2.93 | 1.46 | 0.08 | 0.01 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 64.90 | 44.45 | 1.15 | 0.13 | 81.69 | 0.09 | 0.28 |
| | Saprolit | 1.89 - 2.35 | 43.97 | 2.22 | 5.52 | 0.03 | 21.79 | 7.79 | 2.33 | 0.75 | 0.23 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.01 | 49.90 | 34.18 | 1.74 | 0.07 | 77.21 | 0.28 | 0.36 |
| CB158R | Limonit | 2.35 - 3 | 21.33 | 2.03 | 2.65 | 0.01 | 35.89 | 22.76 | 1.26 | 0.37 | 0.17 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 24.21 | 16.58 | 1.59 | 0.03 | 62.76 | 0.57 | 0.63 |
| | | 3 - 3.44 | 12.96 | 1.50 | 1.62 | 0.01 | 39.72 | 29.90 | 0.78 | 0.21 | 0.50 | 0.18 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 14.71 | 10.07 | 1.18 | 0.02 | 56.05 | 0.71 | 0.75 |
| | Saprolit | 3.44 - 3.72 | 18.15 | 1.74 | 1.71 | 0.01 | 37.41 | 25.96 | 1.30 | 0.33 | 0.12 | 0.12 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 20.59 | 14.10 | 1.37 | 0.03 | 59.71 | 0.63 | 0.69 |
| CB158R | Limonit | 4 - 4.6 | 11.97 | 1.15 | 1.61 | 0.01 | 38.79 | 31.53 | 0.72 | 0.20 | 0.13 | 0.17 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 13.58 | 9.30 | 0.90 | 0.02 | 53.98 | 0.72 | 0.81 |
| | | 1.39 - 1.89 | 9.39 | 1.69 | 1.72 | 0.01 | 40.44 | 32.78 | 0.49 | 0.15 | 0.95 | 0.23 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 10.66 | 7.30 | 1.33 | 0.01 | 52.82 | 0.77 | 0.81 |
| | Harsburgit | 3.72 - 4 | 9.13 | 1.13 | 0.76 | 0.01 | 39.76 | 34.92 | 0.49 | 0.14 | 0.08 | 0.23 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 10.36 | 7.10 | 0.89 | 0.01 | 50.89 | 0.78 | 0.88 |
| CB158R | Limonit | 4.6 - 5 | 8.50 | 0.80 | 1.07 | 0.01 | 39.39 | 35.48 | 0.46 | 0.13 | 0.16 | 0.19 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 9.64 | 6.61 | 0.63 | 0.01 | 50.11 | 0.79 | 0.90 |
| | | 5.0 - 6.0 | 7.66 | 0.27 | 0.78 | 0.01 | 37.42 | 38.45 | 0.37 | 0.11 | 0.49 | 0.20 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 8.69 | 5.95 | 0.22 | 0.01 | 46.90 | 0.80 | 1.03 |
| | Saprolit | 0 - 0.5 | 60.60 | 1.12 | 8.35 | 0.10 | 4.61 | 1.25 | 3.54 | 0.72 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.16 | 0.01 | 68.78 | 47.11 | 0.88 | 0.08 | 81.75 | 0.06 | 0.27 |
| CB158R | Limonit | 0.5 - 1 | 63.04 | 1.08 | 8.83 | 0.07 | 4.00 | 1.09 | 3.57 | 0.83 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.17 | 0.01 | 71.55 | 49.00 | 0.85 | 0.10 | 84.38 | 0.05 | 0.27 |
| | | 1 - 2.0 | 64.50 | 1.19 | 7.75 | 0.06 | 3.45 | 1.09 | 3.61 | 0.90 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.15 | 0.01 | 73.21 | 50.14 | 0.94 | 0.10 | 84.41 | 0.04 | 0.32 |
| | Saprolit | 2 - 2.25 | 64.16 | 1.52 | 6.44 | 0.04 | 4.24 | 1.46 | 3.97 | 1.04 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.13 | 0.01 | 72.83 | 49.88 | 1.20 | 0.11 | 83.51 | 0.05 | 0.35 |
| CB158R | Limonit | 2.25 - 3 | 22.49 | 2.36 | 1.51 | 0.02 | 32.81 | 24.98 | 1.46 | 0.37 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 25.53 | 17.48 | 1.86 | 0.04 | 59.84 | 0.55 | 0.76 |
| | | 3 - 4.0 | 13.37 | 2.12 | 0.63 | 0.01 | 38.30 | 31.06 | 1.03 | 0.22 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 15.17 | 10.39 | 1.66 | 0.03 | 54.10 | 0.71 | 0.81 |
| | Saprolit | 4 - 4.5 | 12.31 | 2.26 | 0.54 | 0.01 | 37.87 | 32.27 | 1.02 | 0.20 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 13.97 | 9.57 | 1.78 | 0.02 | 52.39 | 0.72 | 0.85 |
| CB158R | Limonit | 4.5 - 5.0 | 11.10 | 1.73 | 0.44 | 0.01 | 38.99 | 33.33 | 0.81 | 0.15 | 0.01 | 0 | | | | | | | | | | |

Tabel 1. Lanjutan: Hasil analisis XRF unsur-unsur utama (dalam %) dan perhitungan derajat lateritisasi.

| Thick Bor | Zona | Kedalaman (m) | FeO | NiO | AL ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | MgO | Cr ₂ O ₃ | MnO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | SO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Fe | Ni | Co | SAF | SISAF | MgO/SiO ₂ | |
|------------|------------|---------------|-------|------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|------|
| Limonit | Saprolit | 0-1 | 56.88 | 1.02 | 10.07 | 0.08 | 8.16 | 1.36 | 2.90 | 0.81 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 64.55 | 44.21 | 0.80 | 0.09 | 82.78 | 0.10 | 0.17 | |
| | | 1-2.0 | 59.89 | 1.16 | 10.70 | 0.04 | 5.84 | 1.17 | 2.74 | 0.97 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.01 | 67.98 | 46.56 | 0.91 | 0.09 | 84.52 | 0.07 | 0.20 | |
| | | 2-2.32 | 50.87 | 1.43 | 9.83 | 0.04 | 15.19 | 2.93 | 2.57 | 0.86 | 0.25 | 0.01 | 0.01 | 0.12 | 0.01 | 57.74 | 39.54 | 1.12 | 0.08 | 82.75 | 0.18 | 0.19 | |
| | | 2.32-3 | 31.03 | 1.83 | 7.04 | 0.02 | 33.91 | 9.18 | 1.84 | 0.55 | 0.22 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.12 | 0.01 | 35.22 | 24.12 | 1.44 | 0.05 | 76.17 | 0.45 | 0.27 |
| | | 3-3.5 | 18.26 | 1.66 | 5.62 | 0.01 | 41.75 | 17.98 | 1.27 | 0.28 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 20.72 | 14.19 | 1.31 | 0.03 | 68.10 | 0.61 | 0.43 |
| | | 3.5-3.71 | 16.87 | 1.61 | 4.89 | 0.01 | 41.56 | 20.51 | 1.12 | 0.27 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 19.15 | 13.12 | 1.27 | 0.03 | 65.61 | 0.63 | 0.49 |
| | | 3.71-4 | 11.52 | 1.14 | 3.72 | 0.01 | 40.98 | 28.26 | 0.81 | 0.14 | 0.41 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 13.08 | 8.96 | 0.90 | 0.02 | 57.78 | 0.71 | 0.69 |
| | | 4-4.39 | 14.48 | 1.46 | 4.09 | 0.01 | 42.91 | 22.13 | 0.98 | 0.19 | 1.28 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 16.44 | 11.26 | 1.15 | 0.02 | 63.44 | 0.68 | 0.52 |
| | | 4.39-4.75 | 9.72 | 1.23 | 2.80 | 0.01 | 42.42 | 29.08 | 0.65 | 0.14 | 1.58 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 11.03 | 7.56 | 0.97 | 0.01 | 56.25 | 0.75 | 0.69 |
| | | 5-5.6 | 13.09 | 1.42 | 3.34 | 0.00 | 42.15 | 24.52 | 0.87 | 0.21 | 0.86 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 14.86 | 10.18 | 1.12 | 0.02 | 60.35 | 0.70 | 0.58 |
| 6-6.2 | 11.83 | 1.36 | 2.04 | 0.00 | 41.06 | 29.00 | 0.78 | 0.16 | 0.23 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 13.42 | 9.19 | 1.07 | 0.02 | 56.52 | 0.73 | 0.71 | | |
| Harsburgit | Harsburgit | 4.75-5 | 7.00 | 0.75 | 1.76 | 0.00 | 40.84 | 34.69 | 0.43 | 0.10 | 1.24 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 7.95 | 5.44 | 0.59 | 0.01 | 50.55 | 0.81 | 0.85 | |
| | | 5.6-6 | 8.48 | 1.10 | 2.31 | 0.00 | 40.45 | 32.73 | 0.53 | 0.12 | 0.79 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 9.63 | 6.59 | 0.87 | 0.01 | 52.39 | 0.77 | 0.81 | |
| | | 6.2-7 | 6.78 | 0.35 | 1.22 | 0.00 | 39.19 | 37.55 | 0.32 | 0.09 | 0.18 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 7.69 | 5.27 | 0.28 | 0.01 | 48.10 | 0.81 | 0.96 | |
| | | 7-7.65 | 6.62 | 0.45 | 1.40 | 0.00 | 39.23 | 37.11 | 0.41 | 0.09 | 0.61 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 7.51 | 5.14 | 0.36 | 0.01 | 48.14 | 0.81 | 0.95 |
| | | 7.65-8 | 10.29 | 0.95 | 1.67 | 0.08 | 40.73 | 31.67 | 0.67 | 0.14 | 0.12 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 11.68 | 8.00 | 0.74 | 0.02 | 54.09 | 0.75 | 0.78 |
| | | 8-9.0 | 8.24 | 0.58 | 0.71 | 0.00 | 39.94 | 35.84 | 0.51 | 0.11 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 9.35 | 6.40 | 0.45 | 0.01 | 50.00 | 0.80 | 0.90 |
| | | 9-10.0 | 7.97 | 0.60 | 1.04 | 0.00 | 39.90 | 35.86 | 0.49 | 0.11 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 9.05 | 6.20 | 0.47 | 0.01 | 49.99 | 0.80 | 0.90 |
| | | 10-11.0 | 8.84 | 0.62 | 0.75 | 0.00 | 40.31 | 35.24 | 0.58 | 0.11 | 0.14 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 10.03 | 6.87 | 0.49 | 0.02 | 51.09 | 0.79 | 0.87 |
| | | 11-12.0 | 7.11 | 0.40 | 0.28 | 0.00 | 39.87 | 37.93 | 0.43 | 0.10 | 0.16 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 8.06 | 5.52 | 0.31 | 0.01 | 48.21 | 0.83 | 0.95 |
| | | 12-13.0 | 7.00 | 0.33 | 0.27 | 0.00 | 38.40 | 39.06 | 0.41 | 0.10 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.94 | 5.44 | 0.26 | 0.01 | 46.61 | 0.82 | 1.02 |
| 13-14.0 | 6.79 | 0.31 | 0.79 | 0.00 | 38.56 | 38.57 | 0.40 | 0.10 | 0.23 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.70 | 5.28 | 0.24 | 0.01 | 47.06 | 0.82 | 1.00 | | |
| 14-14.35 | 7.38 | 0.41 | 0.93 | 0.00 | 39.67 | 37.04 | 0.45 | 0.10 | 0.25 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 8.37 | 5.73 | 0.32 | 0.01 | 48.97 | 0.81 | 0.93 | | |
| Limonit | Saprolit | 0-1 | 59.87 | 1.14 | 9.37 | 0.00 | 5.47 | 1.36 | 2.89 | 0.98 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.16 | 0.01 | 67.95 | 46.54 | 0.89 | 0.10 | 82.79 | 0.07 | 0.25 | |
| | | 1-2 | 62.62 | 1.23 | 8.65 | 0.00 | 4.35 | 1.15 | 2.91 | 1.09 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.01 | 71.07 | 48.67 | 0.97 | 0.11 | 84.07 | 0.05 | 0.26 | |
| | | 2-3 | 64.41 | 1.38 | 6.27 | 0.03 | 3.87 | 1.15 | 3.59 | 1.30 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.01 | 73.10 | 50.06 | 1.08 | 0.12 | 83.23 | 0.05 | 0.30 | |
| | | 3-4 | 63.41 | 1.35 | 7.59 | 0.02 | 3.89 | 1.22 | 3.39 | 1.27 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.13 | 0.01 | 71.97 | 49.29 | 1.06 | 0.13 | 83.45 | 0.05 | 0.31 | |
| | | 4-4.4 | 63.75 | 1.65 | 6.30 | 0.02 | 4.67 | 1.30 | 3.56 | 1.30 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.11 | 0.01 | 72.36 | 49.55 | 1.30 | 0.12 | 83.33 | 0.06 | 0.28 | |
| | | 4.4-5 | 49.88 | 2.08 | 5.08 | 0.03 | 15.25 | 7.63 | 3.16 | 0.91 | 0.30 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 56.61 | 38.77 | 1.64 | 0.08 | 76.93 | 0.20 | 0.50 |
| | | 5-5.45 | 25.34 | 2.25 | 4.66 | 0.02 | 32.81 | 19.21 | 1.71 | 0.45 | 0.89 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 28.77 | 19.70 | 1.77 | 0.04 | 66.23 | 0.50 | 0.59 |
| | | 5.65-6.35 | 12.42 | 2.26 | 1.82 | 0.00 | 39.96 | 28.33 | 0.84 | 0.20 | 0.98 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 12.47 | 9.65 | 1.78 | 0.02 | 54.24 | 0.74 | 0.71 |
| | | 6.35-7 | 10.98 | 2.01 | 2.02 | 0.00 | 40.61 | 31.00 | 0.62 | 0.17 | 0.41 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 40.96 | 8.54 | 1.58 | 0.02 | 83.59 | 0.49 | 0.76 |
| | | 5.45-5.65 | 8.47 | 2.25 | 3.01 | 0.00 | 40.37 | 33.24 | 0.49 | 0.13 | 1.39 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 14.10 | 6.58 | 1.77 | 0.01 | 57.48 | 0.70 | 0.82 |
| Harsburgit | Harsburgit | 7.0-8.0 | 8.09 | 0.94 | 1.80 | 0.00 | 40.43 | 35.13 | 0.49 | 0.12 | 1.32 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 9.18 | 6.28 | 0.74 | 0.01 | 51.41 | 0.79 | 0.87 | |
| | | 8.0-9.0 | 7.96 | 0.46 | 1.45 | 0.00 | 39.47 | 36.77 | 0.39 | 0.12 | 1.09 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 9.03 | 6.18 | 0.36 | 0.01 | 49.95 | 0.79 | 0.93 | |
| 9.0-10 | 7.74 | 0.42 | 1.27 | 0.00 | 38.65 | 37.45 | 0.34 | 0.12 | 0.89 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 8.79 | 6.02 | 0.33 | 0.01 | 48.71 | 0.79 | 0.97 | | |



Gambar 8. Index of Lateritization (Taylor,1964)

krisotil. dan mineral opak.

Kandungan unsur-unsur mayor dari hasil analisis *X-ray Fluorescence* diantaranya berupa SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 dan MgO (**Tabel 1**). Pelapukan kimia batuan ultrabasa salah satunya dipengaruhi adanya iklim tropis, iklim tropis yang terjadi di Indonesia menyebabkan curah hujan yang tinggi dan mengalami pergantian musim panas yang sangat cepat. Pergantian

cuaca itulah yang menyebabkan terjadinya proses pelapukan. Selama terjadinya proses pelapukan, air meteorik yang bersifat asam akan berinteraksi dengan batuan ultrabasa, sehingga rasio MgO/SiO_2 akan mengalami penambahan H_2O . Penambahan tersebut akan menyebabkan unsur *mobile* seperti $\text{MgO}+\text{CaO}+\text{SiO}$ akan lepas dan dapat mempengaruhi mineral primer berubah menjadi mineral sekunder dalam

Tabel 2. Tingkat Lateritisasi terhadap pengkayaan kadar Fe-Ni-Co

| Zona lateritisasi | Fe | Ni | Co |
|--------------------|----------|-----------|--------------|
| Lateritisasi kuat | 36-51 % | 0,8-1,4% | 0,07-1,17% |
| Kaolinisasi Sedang | 7,3-24% | 0,8-1,9% | 0,01-0,2% |
| Lateritisasi Lemah | 4,9-7,9% | 0,20-1,8% | 0,005-0,015% |

bentuk oksihidroksida, misalnya hematit (Rollinson, 2014). Akibat dari proses oksidasi yang tinggi, terjadi pula proses disolusi yang melarutkan mineral-mineral lain yang bersifat *mobile* dari unsur-unsur yang larut seperti Ni . Kisaran rasio MgO/SiO₂ pada limonit, saprolit dan batuan dasar masing-masing adalah 0,16–0,58, 0,27–0,85 dan 0,77–1,24. Kadar MgO dan SiO₂ yang merupakan komposisi unsur penyusun mineral dalam batuan asal harsburgit semakin berkurang pada zona laterit akibat proses pelapukan dan pelarutan (**Gambar 7**). Rasio MgO/SiO₂ yang tinggi pada batuan dasar tersebut menunjukkan bahwa harsburgit sudah mengalami serpentinisasi yang kuat (Aquino drr., 2021).

4.2. Derajat Lateritisasi

Derajat lateritisasi adalah tingkatan terjadinya proses pembentukan tanah laterit atau proses lateritisasi akibat pelapukan dari batuan dasar (Taylor, 1964). Derajat lateritisasi merupakan nilai kebalikan dari indeks S/SAF, di mana nilai S/SAF dihitung dari SiO₂ / (SiO₂ + Fe₂O₃ + Al₂O₃). **Gambar 8** menunjukkan

derajat lateritisasi dari 9 profil lubang bor di daerah penelitian. Secara umum, zona limonit memiliki indeks S/SAF berkisar antara 0,04-0,22 (derajat lateritisasi kuat), saprolit 0,06-0,78 (derajat lateritisasi sedang hingga kaolinisasi), dan batuan dasar antara 0,70-0,83.

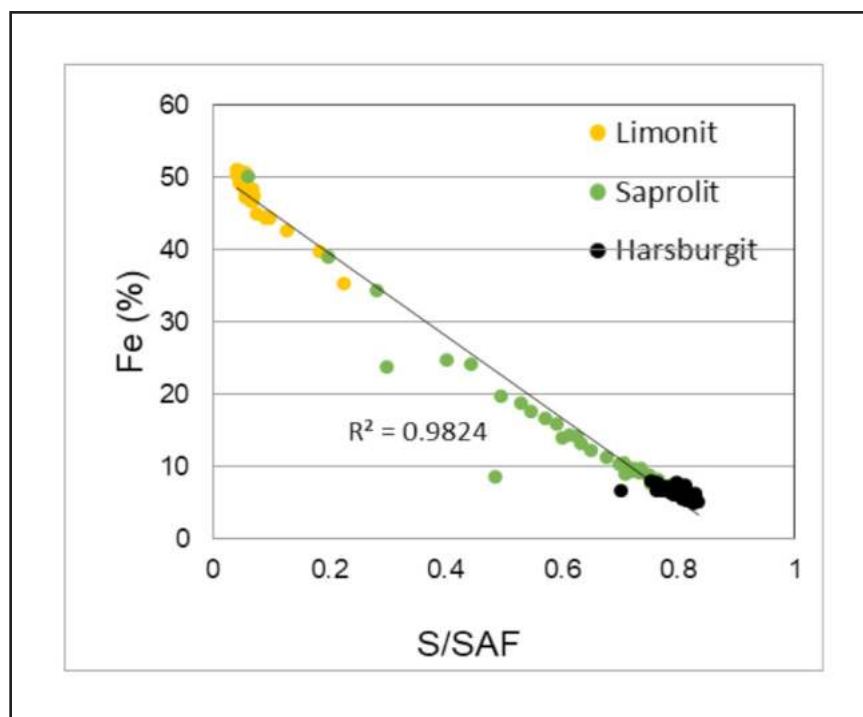
Zona dengan tingkat lateritisasi kuat mengandung Fe 36-51%, Ni 0,8–1,4%, dan Co 0,07-1,17%. Kaolinisasi tingkat sedang mengandung Fe 7,3-24 %, Ni 0,8–1,9%, dan Co 0,01-0,2 %. Batuan dasar harsburgit mengandung Fe 4,9–7,9 %, Ni 0,20-1,8%, dan Co 0,005-0,015%.

Proses pelapukan kimia mengubah mineral mafik plagioklas dan hornblende menjadi mineral oksida seperti Hematit, Gutit, dan Maghemait (Rollinson, 2014). Adanya mineral mafik mengakumulasi Fe dengan kandungan minimal 47% dan Co berada pada zona limonit bagian atas. Tingkat lateritisasi yang tinggi menghasilkan tingkat disolusi yang lebih tinggi. Hal ini akan berdampak pada keberadaan Ni pada zona limonit karena akan larut dan terakumulasi pada zona saprolit dengan kadar minimal 1,5%.

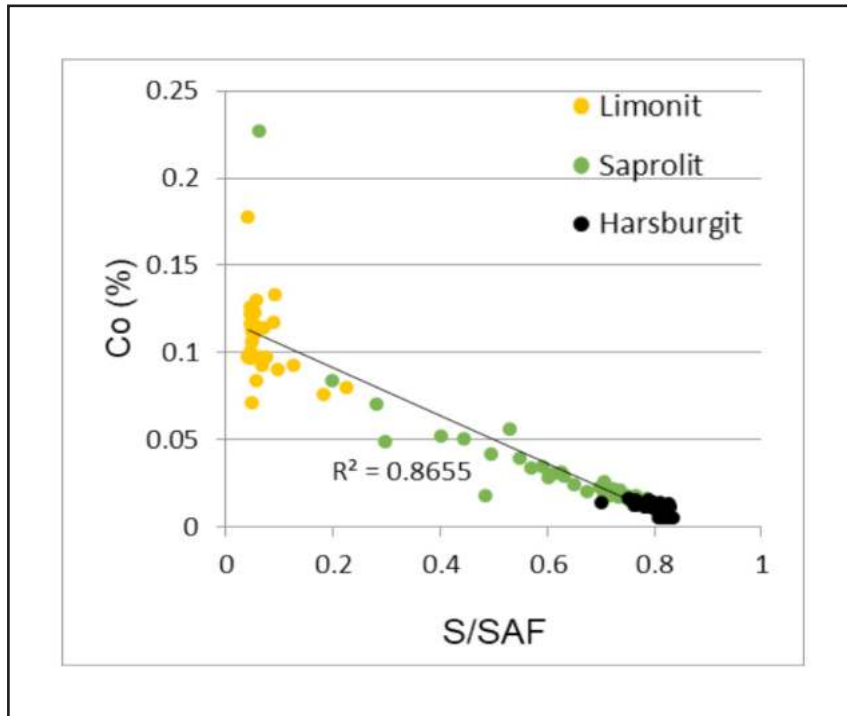
4.3. Korelasi antara indeks S/SAF dengan pengkayaan unsur Fe-Co-Ni

Peningkatan kandungan Fe berkorelasi negatif terhadap indeks S/SAF dan juga terakumulasi di permukaan atas, yaitu zona limonit. Hal ini disebabkan oleh sifat kebal terhadap air dan sifat *immobile* dari Fe (**Gambar 9**) sehingga Fe akan resisten selama proses pelapukan. Kandungan Co berkorelasi negatif terhadap indeks S/SAF dan juga terakumulasi di permukaan atas. Hal ini karena Co merupakan unsur kritis golongan VIII B yang berdekatan dengan unsur Fe, memiliki massa atom yang

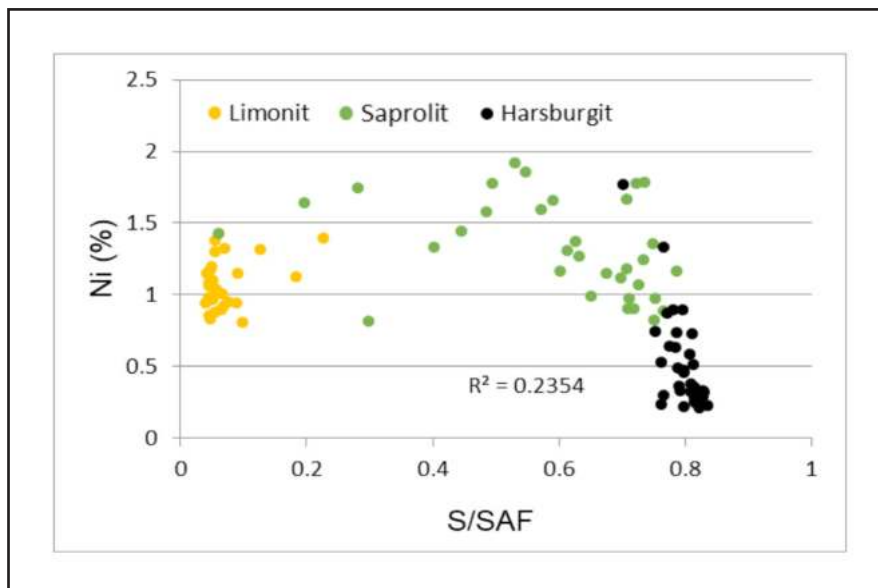
sama sehingga sifat yang dihasilkan sama, yaitu resisten terhadap pelapukan (**Gambar 10**). **Gambar 11** menggambarkan bahwa semakin banyak Ni yang terlarut dan terakumulasi dalam zona saprolit (Ogura, 1977). Hal ini disebabkan oleh adanya mineral olivin minor sebagai sumber pembentukan Ni dan sifat *semi-soluble* Ni. Zona limonit mengandung 0,8-1,3% Ni yang berkorelasi dengan lateritisasi kuat, zona saprolit mengandung 0,8–1,85% Ni dalam zona kaolinisasi sampai lateritisasi sedang dan batuan dasar mengandung 0,2 -1,3% Ni.



Gambar 9. Korelasi antara Fe vs S/SAF



Gambar 10. Korelasi antara Co vs S/SAF



Gambar 11. Korelasi antara Ni vs S/SAF

5. KESIMPULAN

Endapan laterit yang mengandung unsur ekonomis Fe-Ni-Co di daerah penelitian terbentuk dari hasil pelapukan batuan asal harsburgit. Perbedaan utama produk pelapukan dikendalikan oleh derajat lateritisasi. Pengayaan antara Fe, Co dengan derajat lateritisasi selalu berkorelasi negatif. Tetapi derajat lateritisasi tidak dapat berkorelasi dengan pengayaan Ni, karena mobilitas unsur tersebut. Pada umumnya, di zona limonit Ni akan tercuci oleh air meteorik. Semuanya disebabkan oleh perilaku unsur utama Fe, Ni, Co, topografi, dan iklim juga penting untuk proses laterit yang rumit. Ada penurunan besar MgO dan peningkatan SiO₂ dan Fe₂O₃ dari batuan induk melalui lateritisasi yang terdekomposisi menjadi laterit.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Sebuku Iron Lateritic Ores telah mengizinkan kami untuk menggunakan data, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung sebagai tempat melakukan analisis.

7. DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, W. (2008). Nickel laterites— Fundamentals of chemistry, mineralogy, weathering processes, formation, and exploration. Vale Inco–VITSL.

Aquino, K., Arcilla, C., Schardt, C., & Tupaz, C. (2021). Linking serpentinization and weathering of peridotit: A study on the mineralogical and geochemical evolution of the Sta. Cruz nickel laterite deposit, Zambales, Philippines.

Butt, M. Cluzel, D., 2013, Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites, Elements v.9, pp 123-128.

Marsh, E. Anderson, Eric. Gray, F., 2013, Nickel-cobalt laterites - A deposit model, chap. H of Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–H, 38 p.

OGURA, Y. (1977). Mineralogical Studies on the Occurrence of Nickeliferous Laterite Deposits in the Southwestern Pacific Area. *Mining Geology*, 27(146), 379-399.

Robb, L. (2005). Introduction to ore-forming processes. John Wiley & Sons.

Rollinson, H. R. (2014). Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Routledge.

Rustandi, E., Nila, E.S., Sanyoto, P. dan Margono, U. 1995. Laporan Geologi Lembar Kotabaru, Kalimantan Selatan Skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Streckeisen, A.L. (1973) Plutonic Rocks: Classification and Nomenclature Recommended by the I.U.G.S. Sub-Commission on the Systematic of Igneous. Rocks, *Geo, Times*, 18, 26-30.

Taylor, R.M., McKenzie, R.M., Norrish, K. 1964. The mineralogy and chemistry of

manganese in some Australian soils. *Aust. Jour. Soil. Res.*2, p.235-248. Australia.

-----, 2022. Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral dan Batubara Indonesia Tahun 2022, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Bandung.



Evaluasi Kinerja dan Keandalan Teknologi Lidar Sebagai Solusi *Monitoring* Deformasi Massa Batuan pada Tambang Bawah Tanah

Performance Evaluation and Reliability of Lidar Technology As a Solution for Monitoring Rock Mass Deformation in Underground Mines

Ilham Nurhakim

Program Studi Teknologi Pertambangan Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
email: nhakimilham10@gmail.com

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci: Kestabilan lubang bukaan, Evaluasi LIDAR, Deformasi, *Geotech Monitoring Lidar* (GML), *C-ALS Analysis*.

Penelitian ini berfokus pada penggunaan teknologi *Light Detection and Ranging* (LIDAR) dalam pemantauan deformasi massa batuan di tambang bawah tanah. Tambang bawah tanah dengan kelas massa batuan yang rendah sering menghadapi tantangan geoteknik secara signifikan yang dapat mempengaruhi kestabilan dan keamanan operasi penambangan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR melalui penggunaan instrumen *Geotech Monitoring Lidar* (GML) dalam pemantauan deformasi massa batuan di salah satu tambang bawah tanah PT XYZ yang terletak di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Hasil dari penelitian ini mengungkapkan bahwa GML mampu memberikan data deformasi massa batuan dengan tingkat akurasi tinggi. Instrumen ini mampu menghasilkan data dalam bentuk *point cloud* yang memungkinkan analisis mendalam terhadap perubahan geometri dan deformasi massa batuan. Berdasarkan

hasil pemantauan menggunakan GML pada area penelitian, besar dan laju deformasi di area lubang bukaan horizontal (*bottom chamber*) dinyatakan relatif stabil menurut Cording (1974), *Ground Control Management Plan* (GCMP) PT XYZ, dan Zhenxiang (1984). Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa keterbatasan GML, terutama dalam pemantauan lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise*. Untuk mengatasi keterbatasan ini, peneliti merekomendasikan penggunaan instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*) sebagai alternatif yang lebih efektif dalam menganalisis stabilitas lubang bukaan *vertical raise*. C-ALS memungkinkan pemantauan konvergensi yang penting untuk mengevaluasi stabilitas *raise* dengan lebih akurat. Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menegaskan bahwa teknologi LIDAR memiliki potensi besar dalam pemantauan deformasi massa batuan di tambang bawah tanah. Namun, pemilihan instrumen yang sesuai dengan jenis lubang bukaan yang diteliti adalah langkah penting untuk memastikan pemantauan deformasi dan stabilitas yang akurat. Pemantauan yang berkelanjutan sangat penting untuk menjaga keamanan dan efisiensi operasi penambangan, khususnya dalam tambang bawah tanah dengan kelas massa batuan yang rendah. Dengan terus memperbaiki dan mengembangkan teknologi LIDAR serta instrumen pemantauannya, industri pertambangan dapat lebih efektif mengelola risiko dan meningkatkan operasi tambang bawah tanah.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords: *Underground Stability, Evaluation of LIDAR, Geotech Monitoring Lidar (GML), deformation, C-ALS Analysis.*

This research focuses on the application of Light Detection and Ranging (LIDAR) technology for monitoring deformations in underground mining. Underground mines with low rock mass rating frequently encounter significant geotechnical challenges that can have substantial implications for the stability and safety of mining. This study aims to comprehensively assess the performance and reliability of LIDAR technology through the

utilization of the Geotech Monitoring Lidar (GML) instrument in one of PT XYZ's underground mines located in North Halmahera Regency, North Maluku Province. The results of this study demonstrate that GML is highly effective in providing precise data on rock mass deformations. The instrument generates data in the form of a point cloud, allowing for detailed analysis of changes in rock mass geometry and deformations. Based on the monitoring carried out using GML, it was determined that the amount and velocity of deformations were relatively stable according to the classifications defined by Cording (1974), PT XYZ's Ground Control Management Plan (GCMP), and Zhenxiang (1984). Nonetheless, the study also identifies certain limitations of GML, particularly in the context of monitoring vertical openings like vertical raises. To address these limitations, the research recommends the adoption of the Cavity Auto Scanning Laser (C-ALS) instrument as a more effective alternative for assessing the stability of vertical raises. C-ALS enables critical convergence monitoring, enhancing the precision of raise stability evaluations. In summary, this research underscores the significant potential of LIDAR technology for monitoring rock mass deformations in underground mining operations. Nonetheless, the selection of instruments tailored to the type of opening is a critical step to ensure precise monitoring of deformations and stability. Continuous monitoring is essential for upholding mining safety and efficiency. Through ongoing enhancements and refinements in LIDAR technology, the mining industry can more effectively mitigate risks and optimize the performance of underground mining operations.

1. PENDAHULUAN

Pada area tambang bawah tanah yang memiliki sifat material dengan kelas massa batuan yang rendah, seringkali muncul indikasi masalah geoteknik yang membutuhkan perhatian khusus. Ketika lubang bukaan

dibuat pada tambang bawah tanah, tegangan alamiah pada massa batuan akan mengalami redistribusi, meninggalkan tegangan sisa sebagai dampaknya. Perilaku dan penyebaran distribusi tegangan (*stress*) dan deformasi yang terjadi akan berdampak pada kestabilan di area

lubang bukaan. Selain itu, menurut Firaz et al., (2018), aktivitas penambangan bawah tanah, terutama di sekitar lokasi lubang bukaan akan selalu menghadapi tantangan deformasi dan ketidakstabilan pada massa batuan.

Deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi keamanan dan efisiensi operasi penambangan. Apabila penanganannya terlambat, maka akan dapat merusak infrastruktur tambang, mengganggu kegiatan produksi, atau bahkan menimbulkan korban jiwa. Oleh karena itu, *monitoring* deformasi massa batuan secara terus-menerus dan akurat sangat penting untuk mencegah dan mengatasi potensi bahaya tersebut.

Selama beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi pemantauan geoteknik telah menghadirkan inovasi signifikan dalam pemahaman tentang stabilitas kondisi di dalam tambang bawah tanah (Macciotta, 2021). Salah satu teknologi yang telah terbukti efisien adalah *Light Detection and Ranging*

(LIDAR), yang memungkinkan pengumpulan data yang sangat akurat mengenai perubahan geometri dan deformasi yang terjadi secara berkala di area tambang tersebut (Lee & Choi, 2019). Teknologi LIDAR adalah sebuah metode pemindaian jarak jauh berbasis laser yang mengumpulkan data titik koordinat dari permukaan suatu area dalam tiga dimensi (3D) dengan tingkat resolusi yang tinggi dan data ini sering disebut sebagai “*point cloud*” (Slaker, 2015). LIDAR adalah sebuah teknologi *optical remote sensing* yang mampu mengukur jarak serta posisi lokal dari target dengan tingkat akurasi yang tinggi (Hu, 2013). LIDAR juga memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, mobilitas, dan kemampuan untuk mengukur area yang sulit dijangkau oleh metode konvensional.

Namun, teknologi LIDAR juga memiliki beberapa keterbatasan dan tantangan dalam penerapannya di tambang bawah tanah. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan LIDAR antara lain



Gambar 1. Bagian-Bagian Area Penelitian (Dokumentasi Pribadi)

adalah geometri lubang bukaan yang bervariasi, pengambilan data, dan metode analisis yang digunakan. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR sebagai solusi *monitoring* deformasi massa batuan yang efektif pada tambang bawah tanah.

Adapun evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR ini dilakukan berdasarkan hasil penelitian penulis yang dilakukan di salah satu tambang bawah tanah PT XYZ di Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Area yang menjadi fokus studi pada penelitian ini adalah lubang bukaan *egress 4* yang terdiri dari *bottom chamber*, *vertical raise*, dan *upper chamber* yang terhubung langsung dengan *egress 3* (Gambar 1). Lubang bukaan pada lokasi penelitian berada pada kedalaman 270 m di bawah permukaan yang berfungsi sebagai jalur ventilasi udara segar (*fresh air base*).

2. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR dalam *monitoring* deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah. Sebelumnya, belum pernah dilakukan kajian serupa baik terkait penelitian stabilitas pada lubang bukaan vertikal maupun evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR pada lubang bukaan di PT XYZ. Oleh karena itu, penelitian

ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi LIDAR sebagai solusi *monitoring* deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah. Penelitian ini juga dapat memberikan informasi yang berguna bagi para praktisi dan peneliti di bidang penambangan bawah tanah tentang potensi, manfaat, dan tantangan dari teknologi LIDAR.

Penelitian ini menggunakan data LIDAR yang diperoleh dari hasil penelitian penulis sebelumnya yang dilakukan di salah satu tambang bawah tanah PT XYZ. Pada penelitian ini digunakan instrumen *Geotech Monitoring Lidar* (GML). Data LIDAR dianalisis secara otomatis menggunakan *software* instrumen dengan membandingkan besar dan laju deformasi dari setiap hasil *monitoring*. Selain itu, penelitian ini juga akan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja dan keandalan LIDAR serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan kualitas pengukuran LIDAR di tambang bawah tanah.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, penulis membagi metodologi penelitian yang terdiri dari empat tahap, yaitu:

3.1. Pengambilan data LIDAR

Tahap ini dilakukan dengan menggunakan instrumen GML yang dipasang di salah satu area lubang bukaan tambang bawah tanah PT

XYZ. Instrumen GML dapat mengukur besar dan laju deformasi massa batuan berdasarkan jarak antara sensor dan permukaan massa batuan dengan menggunakan laser. GML yang digunakan merupakan produk dari GroundProbe. Adapun Gambar 2 menunjukkan bagian-bagian dari instrumen GML.

Untuk mendapatkan data yang besar dan kecepatan deformasi yang tinggi di area lokasi penelitian, langkah-langkah pengukuran berikut ini dilakukan menggunakan *Geotech Monitoring Lidar* (GML):

1. Pemasangan *target point* pada bagian dinding dilakukan sebagai langkah pertama.
2. Tripod dipasang dan diatur sehingga berada dalam posisi pusat dengan ketelitian minimal 30 detik.
3. Folder penyimpanan hasil pemindaian *monitoring* dibuat.

4. Data dari titik target yang telah dipasang sebelumnya diambil, dan proses pemindaian (*scanning*) dilakukan.

Pemantauan deformasi pada area *bottom chamber egress 4* dilaksanakan dengan menggunakan GML selama periode 25 hari, mulai dari tanggal 17 Januari hingga 10 Februari 2023. Proses ini melibatkan enam kali pemindaian. Di dalam area *egress 4*, empat titik target dipasang untuk memantau deformasi pada lubang bukaan area *bottom chamber*. Tujuan dari penempatan titik-titik target ini adalah untuk mengurangi faktor koreksi yang diperlukan saat membaca hasil dari GML (Hu, 2013).

Mekanisme kerja LIDAR melibatkan pemindaian area tertentu pada interval waktu tertentu. Hasil pemindaian ini kemudian diukur, dibandingkan, dan dianalisis untuk



Gambar 2. *Geotech Monitoring Lidar* (GML)
(GroundProbe, 2023)

mendapatkan informasi tentang besarnya deformasi maksimum. Stabilitas lubang bukaan dievaluasi berdasarkan data pemantauan mengenai besar dan kecepatan deformasi maksimum.

3.2. Pengolahan data LIDAR

Tahap ini dilakukan dengan menggunakan software instrumen yang dapat mengolah data LIDAR secara otomatis. Software instrumen dapat mengkonversi data LIDAR menjadi data spasial 3D dengan resolusi tinggi. Software instrumen juga dapat melakukan registrasi data LIDAR dari berbagai waktu dan posisi untuk mendapatkan data LIDAR terpadu. Selain itu, software instrumen dapat melakukan koreksi geometrik dan atmosferik pada data LIDAR untuk menghilangkan distorsi dan gangguan yang mungkin terjadi.

3.3. Analisis Deformasi Massa Batuan

Tahap ini dilakukan dengan menggunakan *software* instrumen *Geotech Monitoring Lidar* (GML) yang dapat menganalisis data LIDAR secara terpadu untuk menghitung besar dan laju deformasi massa batuan. *Software* pada instrumen tersebut dapat membandingkan data LIDAR dari waktu ke waktu untuk mendeteksi perubahan geometri pada permukaan massa batuan di area lubang bukaan. Hasil analisis deformasi massa batuan akan ditampilkan dalam bentuk grafik.

3.4. Evaluasi kinerja dan keandalan LIDAR

Tahap ini dilakukan dengan menganalisis hasil pengukuran dan mengamati kondisi lapangan selama monitoring berlangsung. Dari tahap ini, diperoleh informasi tentang keterbatasan GML sebagai bahan perbaikan dalam monitoring deformasi massa batuan pada tambang bawah tanah dengan berbagai jenis lubang bukaan. Selain itu, tahap ini juga akan memberikan rekomendasi untuk meningkatkan kualitas pengukuran LIDAR di tambang bawah tanah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Indikasi Ketidakstabilan dan Karakteristik Batuan

Di bawah ini adalah informasi yang diperoleh dari pengumpulan data mengenai tanda-tanda potensi ketidakstabilan dan karakteristik batuan di lokasi penelitian.

a. Indikasi Ketidakstabilan Area Penelitian

Terdapat beberapa indikasi ketidakstabilan yang mencakup *unravelling shotcrete* di area dinding *bottom chamber* dan munculnya tetesan air tanah dekat *bottom raise*. Kondisi ini telah menyebabkan penurunan kemampuan penyanggaan dan kekuatan properti material batuan. Indikasi-indikasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.

Melalui pengamatan langsung di lokasi



Gambar 3 *Unravelling Shotcrete* di Area *Bottom Chamber* (Gambar A) dan Tetesan Air Tanah di Dekat *Vertical Raise* (Gambar B) (Dokumentasi Pribadi)

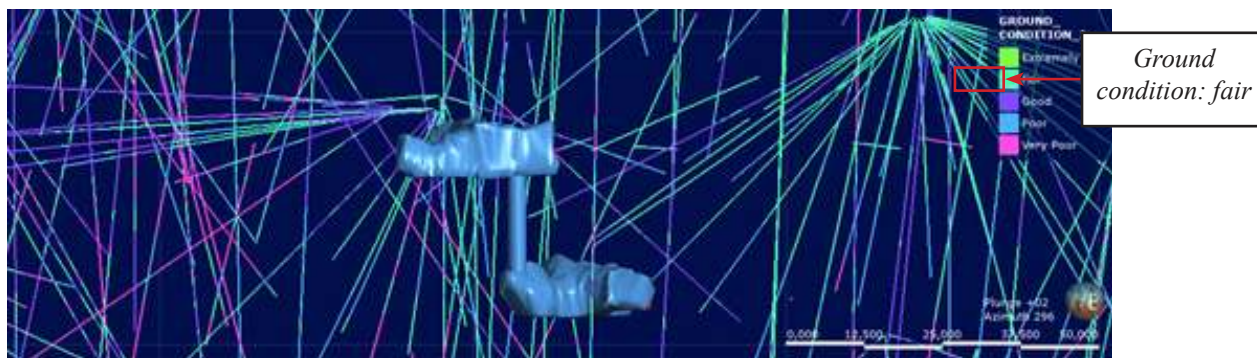
penelitian, ditemukan beberapa retak (*crack*) pada lapisan *shotcrete* yang jatuh dan tertahan oleh *wire mesh*. Di beberapa titik lainnya, *wire mesh* patah karena tidak mampu menahan beban dari retakan pada *shotcrete* yang jatuh. Indikasi ini dikenal sebagai *unravelling shotcrete*, yang merupakan tanda awal ketidakstabilan. Beberapa faktor dapat menyebabkan munculnya indikasi ketidakstabilan ini, salah satunya adalah penurunan kemampuan penyanggaan akibat hilangnya efek pembatasan (*confinement effect*). Hilangnya *confinement effect* ini bisa disebabkan oleh deformasi atau adanya infiltrasi air tanah yang terjadi di area penelitian.

b. Rock Mass Rating (RMR)

Informasi mengenai klasifikasi massa batuan dengan metode *Rock Mass Rating* (RMR) diperoleh melalui kajian yang dilakukan oleh Departemen *Technical Service* PT XYZ

menggunakan teknik pengeboran geoteknik. Melalui hasil pengeboran geoteknik tersebut, selanjutnya diperoleh nilai RMR secara keseluruhan yang ada pada area *Egress 4*. Data tersebut kemudian diproses menggunakan perangkat lunak *Leapfrog Geo* untuk menghasilkan model geologi yang mencakup informasi tentang kelas massa batuan di lokasi penelitian, sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rusmansyah (2009), jenis massa batuan di lokasi penelitian yaitu andesit.

Klasifikasi kondisi batuan dilakukan secara lokal di Tambang Bawah Tanah XYZ dengan menggunakan sistem RMR1976 serta observasi kondisi lubang bukaan di lokasi penelitian. Data RMR diperoleh berdasarkan data sekunder pengeboran geoteknik yang dilakukan oleh PT XYZ. Berdasarkan informasi yang tercantum dalam Gambar 4, dapat disimpulkan bahwa bobot massa batuan di *Egress 4* masuk ke dalam



Gambar 4. Ground Condition Egress 4 (Dokumentasi Pribadi)

kelas massa batuan tipe II, yang dikenal sebagai “*fair rock*” (Departemen Technical Service PT XYZ, 2017). Informasi terkait kelas massa batuan pada area penelitian ini merupakan informasi penting dalam pemahaman lebih lanjut tentang stabilitas dan geoteknik di area tersebut.

4.2. Monitoring Deformasi Batuan

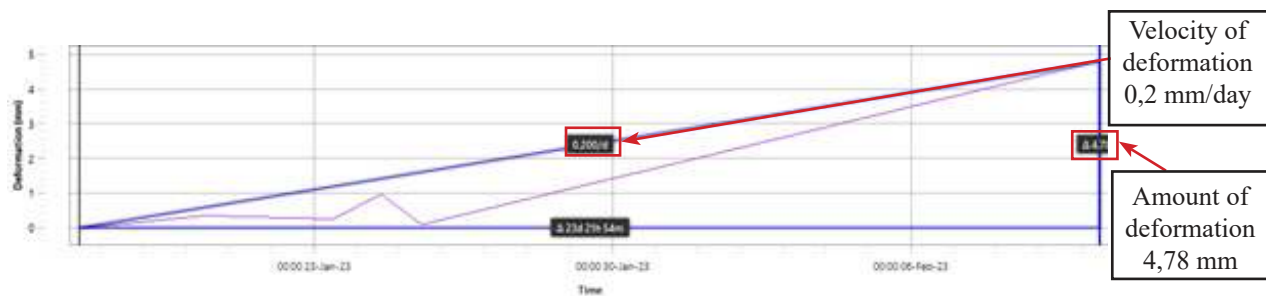
Hasil pemindaian (*scanning*) *monitoring* menggunakan GML menghasilkan data *point cloud* dengan jutaan koordinat. Setiap titik dalam data *point cloud* ini memiliki koordinat x, y, dan z yang tercatat. Tabel 1 berikut ini

memuat beberapa contoh data koordinat yang diperoleh dari pemantauan menggunakan GML:

Setiap pergerakan titik dapat terdeteksi dengan akurat saat data tersebut dibandingkan dengan hasil pemantauan sebelumnya melalui pengolahan data menggunakan perangkat lunak *GroundProbe*. Hasil pemantauan ini disimpan dalam folder penyimpanan khusus yang terkait dengan lokasi penelitian, memungkinkan akumulasi semua data *point cloud* untuk selanjutnya diproses menggunakan perangkat lunak *GroundProbe*. Melalui pengolahan data *monitoring*, kita dapat menghitung besar dan

Tabel 1. Sampel Koordinat Hasil *Monitoring* GML

| No | X | Y | Z |
|----|---------|--------|---------|
| 1 | -0.0002 | 14.828 | -14.456 |
| 2 | -0.0002 | 14.912 | -14.504 |
| 3 | -0.0002 | 14.942 | -14.494 |
| 4 | -0.0002 | 1.498 | -14.498 |
| 5 | -0.0002 | 1.497 | -14.448 |



Gambar 5. Chart Besar dan Laju Deformasi Berdasarkan GML (Dokumentasi Pribadi)

laju deformasi pada titik yang mengalami pergerakan maksimum di area lokasi penelitian. Proses ini dilakukan secara otomatis dengan bantuan perangkat lunak *GroundProbe*. Dari pengolahan data tersebut, ditemukan bahwa besar deformasi maksimum mencapai 4,78 mm dengan laju deformasi sebesar 0,2 mm per hari (lihat Gambar 5).

Pemantauan menggunakan *Geotech Monitoring Lidar* (GML) telah memberikan wawasan yang sangat berharga tentang besar dan laju deformasi di area *bottom chamber egress 4*. Data yang dihasilkan dalam bentuk data *point cloud* dengan jutaan koordinat telah memungkinkan untuk melacak pergerakan titik dengan akurasi tinggi. Dari hasil pemantauan, terlihat bahwa pergerakan maksimum di *front wall area bottom chamber* mencapai 4,78 mm dengan laju deformasi sebesar 0,2 mm per hari. Deformasi tersebut termasuk ke dalam kategori sangat kecil dan relatif stabil menurut klasifikasi Cording pada 1974 yang dikutip oleh Hulwani et al., (2022), *Ground Control Management Plan* (GCMP) PT XYZ, dan

(Zhenxiang, 1984). Ini adalah informasi yang sangat penting dalam mengevaluasi stabilitas di lokasi penelitian.

Namun, saat menginterpretasikan hasil pemantauan, diperoleh informasi bahwa GML memiliki keterbatasan dalam pemantauan deformasi pada lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise* di *egress 4*. Meskipun GML sangat efektif dalam memantau deformasi di permukaan batuan datar, keberadaan lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise* dapat menjadi tantangan karena GML tidak dapat langsung mengakses area tersebut. Oleh karena itu, penting untuk menyadari bahwa hasil pemantauan dengan GML hanya mencakup area yang dapat dijangkau oleh alat pemindaian. Area yang tidak dapat dijangkau oleh GML, seperti *vertical raise*, memerlukan metode pemantauan tambahan yang lebih spesifik untuk mengukur deformasi di dalamnya. Ini mungkin termasuk penggunaan alat pemantauan lain yang dirancang khusus untuk lingkungan seperti itu.

Meskipun hasil pemantauan menunjukkan

bahwa area *bottom chamber egress* 4 saat ini dinyatakan stabil, perlu diingat bahwa pemantauan harus tetap dilakukan secara rutin untuk memastikan bahwa kondisi tersebut tetap terkendali. Hal ini khususnya penting mengingat keterbatasan GML dalam pemantauan deformasi di area-area tertentu. Pemantauan yang berkelanjutan akan membantu memastikan bahwa area *bottom chamber* tetap aman dalam jangka waktu yang lebih panjang.

4.3. Evaluasi Kinerja Teknologi LIDAR

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperlukan suatu evaluasi terkait kinerja instrumen GML agar kebutuhan untuk analisis deformasi massa batuan pada lubang bukaan dapat diperoleh secara efektif dan efisien sesuai dengan jenis lubang bukaan yang dilakukan pemantauan. Teknologi LIDAR pada instrument GML telah membuktikan diri sebagai alat yang sangat efektif dalam pemantauan deformasi dan stabilitas di Tambang Bawah Tanah PT XYZ. Keunggulan utama LIDAR mencakup:

- a. Fleksibilitas: LIDAR memiliki kemampuan untuk memantau perubahan dalam bentuk tiga dimensi pada area yang luas dan kompleks. Ini memungkinkan pemantauan yang sangat mendetail pada lokasi penelitian, termasuk pengukuran deformasi dan pergeseran batuan dengan presisi tinggi.
- b. Mobilitas: Alat pemantauan LIDAR dapat

dipindahkan dengan relatif mudah ke berbagai lokasi di dalam tambang bawah tanah. Ini memungkinkan pemantauan yang lebih luas dan dapat diakses di berbagai bagian tambang.

- c. Kemampuan Mengukur Area Sulit dijangkau: Salah satu keunggulan utama LIDAR adalah kemampuannya untuk mengukur area yang sulit dijangkau atau berbahaya bagi manusia. Dengan menggunakan instrumen GML, kita dapat memantau area-area yang mungkin sulit dijangkau oleh tenaga manusia, seperti *bottom chamber*, dengan aman dan efisien.
- d. Menyajikan hasil evaluasi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian di Tambang Bawah Tanah PT XYZ.

Dalam rangka mengevaluasi kinerja instrumen GML, maka diperlukan juga untuk menganalisis faktor-faktor yang menjadi tantangan, keterbatasan, serta mempengaruhi kinerja dan keandalan instrument GML. Terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi kinerja dan keandalan teknologi LIDAR di lingkungan tambang bawah tanah, termasuk:

- a. Geometri lubang bukaan yang beragam: Bentuk dan karakteristik lubang bukaan tambang dapat beragam, sehingga mengharuskan penyesuaian pemindaian dan pengaturan instrumen LIDAR yang

berbeda. Ini dapat mempengaruhi akurasi hasil pemantauan.

- b. Pengambilan data yang konsisten: Konsistensi dalam pengambilan data selama pemantauan sangat penting. Gangguan atau perubahan dalam pengaturan pemindaian dapat memengaruhi hasil dan menghasilkan data yang tidak konsisten.
- c. Metode analisis yang tepat: Pemilihan metode analisis yang tepat sangat penting. Kesalahan dalam metode analisis dapat menghasilkan interpretasi yang tidak akurat tentang deformasi dan stabilitas massa batuan.
- d. Interferensi sinyal: Interferensi sinyal dari faktor-faktor lingkungan seperti debu, uap air, atau penghalang fisik dapat memengaruhi kinerja LIDAR dan mengganggu pengumpulan data yang akurat.
- e. Perawatan dan kalibrasi: Perawatan dan kalibrasi rutin pada instrumen LIDAR sangat penting untuk menjaga keandalan alat dan akurasi hasil pemantauan.

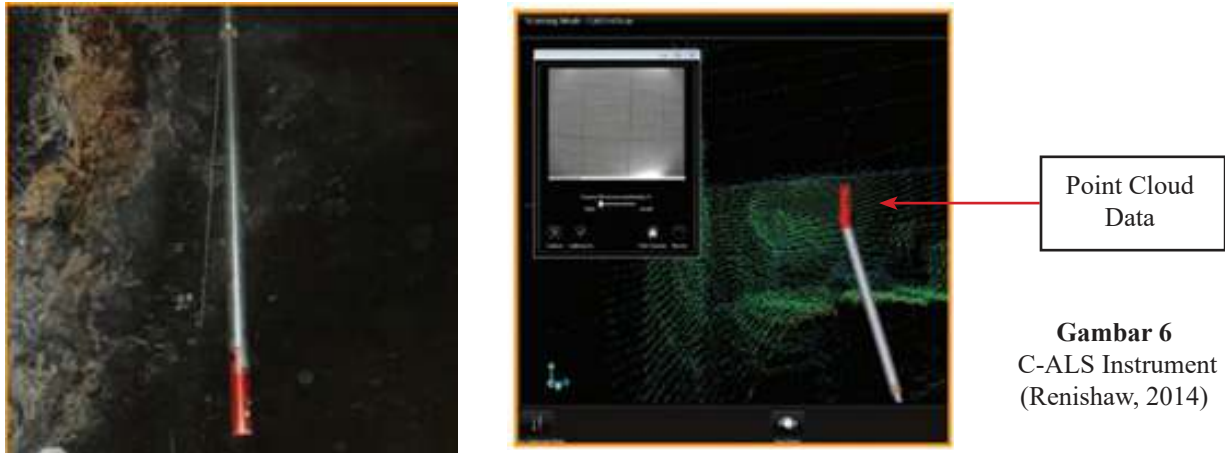
4.4. Tantangan Pemantauan Deformasi pada *Vertical Raise*

Selain pemantauan di area *bottom chamber*, dalam penelitian ini juga dilakukan upaya untuk memanfaatkan teknologi LIDAR melalui instrumen GML guna memonitor *vertical raise* di lokasi penelitian. Namun, hasil penelitian

menyimpulkan bahwa teknologi LIDAR pada GML ternyata tidak cukup efektif dalam menganalisis deformasi pada jenis lubang bukaan *vertical raise* yang khas di lokasi tersebut. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik antara jenis lubang bukaan vertikal dan horizontal, di mana parameter penilaian stabilitasnya terfokus pada dinding (*wall*) *vertical raise*, yang tidak memiliki atap (*roof*) seperti lubang bukaan *horizontal bottom chamber*. Oleh karena itu, sistem kinerja yang dimiliki oleh instrumen GML tidak sesuai untuk analisis stabilitas berdasarkan deformasi pada jenis lubang bukaan *vertical raise*.

Sebagai solusi, maka direkomendasikan untuk mencoba uji coba (*trial*) penggunaan instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*) untuk menganalisis stabilitas pada *vertical raise*. Instrumen ini memungkinkan pemantauan deformasi dengan cara membandingkan geometri awal dan akhir dari lubang bukaan *raise*. Dengan menggunakan C-ALS, maka dapat diukur besar konvergensi (*convergence*) yang dialami oleh lubang bukaan *raise*, yang merupakan parameter kunci untuk mengevaluasi stabilitasnya.

Perkembangan penggunaan metode laser secara tiga dimensi semakin canggih dan digunakan dalam berbagai kebutuhan industri tambang. Salah satunya yaitu penggunaan *3D cavity detection* dalam instrumen C-ALS. Instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*)



Gambar 6
C-ALS Instrument
(Renishaw, 2014)

adalah alat pemantauan yang dikembangkan khusus untuk analisis stabilitas pada lubang bukaan vertikal seperti *vertical raise* di lingkungan tambang bawah tanah. Instrumen ini bekerja dengan prinsip pemindaian laser yang otomatis dengan menghasilkan *point cloud data* yang akurat untuk mengukur geometri lubang bukaan secara berkala. Penggunaan C-ALS dalam industri pertambangan terbukti efektif dan sudah mulai banyak digunakan seperti dalam penelitian terkait pengaplikasian C-ALS untuk mendeteksi dan memodelkan geometri lubang bukaan tambang bawah tanah yang dilakukan oleh XI-ling, dkk pada tahun 2008.

Penggunaan instrumen yang sesuai dengan jenis lubang bukaan yang diteliti adalah langkah penting dalam memastikan pemantauan deformasi dan stabilitas yang akurat. Khususnya di lingkungan tambang bawah tanah yang memiliki geometri dan jenis

lubang bukaan yang beragam. Rekomendasi untuk menggunakan C-ALS sebagai alternatif teknologi pemantauan adalah langkah yang sangat tepat untuk mencapai tujuan tersebut.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan berdasarkan penelitian penggunaan teknologi LIDAR pada instrumen GML, diperoleh beberapa kesimpulan terkait evaluasi kinerja dan keandalan instrumen tersebut sebagai berikut:

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi LIDAR, khususnya GML, dapat digunakan untuk memantau deformasi massa batuan dalam kondisi tambang bawah tanah. Hasil pemantauan menyediakan data deformasi secara akurat dan memberikan gambaran yang jelas tentang perubahan massa batuan seiring waktu. Deformasi yang diamati di lokasi penelitian, terutama di area *bottom chamber*,

berada dalam kategori deformasi yang aman berdasarkan standar *Ground Control Management Plan* PT XYZ.

Penelitian ini juga mengidentifikasi bahwa teknologi LIDAR pada instrumen GML memiliki keterbatasan dalam menganalisis deformasi pada jenis lubang bukaan *vertical raise* yang khas di lokasi penelitian. Oleh karena itu, rekomendasi diberikan untuk menggunakan instrumen C-ALS (*Cavity Auto Scanning Laser*) sebagai alternatif untuk menganalisis stabilitas *raise* dengan lebih efektif.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Technical Service PT XYZ. (2017). *Ground Control Management Plan (GCMP) Tambang Bawah Tanah Kencana*. PT NHM.
- Firaz, F. M., Lewier, E. S., Killo, K. L., & Yusias, A. e. (2018). Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Tambang Bawah Tanah Menggunakan Metode Elmen Hingga. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 205-212.
- GroundProbe. (2023, 11 01). *GroundProbe* . Retrieved from LIDAR: <https://www.groundprobe.com/lidar/>
- Hu, H. (2013). Deformation monitoring and modeling based on LiDAR data for slope stability assessment Von der Fakultät für Georesourcen und Materialtechnik der Rheinisch -Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors de. 16-17.
- Hulwani, Z., Sulistianto, B., Widodo, N. P., Septiyanto, E., & Musyafiq, A. N. (2022). Analisis Kestabilan Terowongan Menggunakan Data Pemantauan Deformasi Massa Batuan Dengan Total Station Pada Terowongan Kereta Api Notog. *Jurnal GEOSAPTA*, 45.
- Lee, S. J., & Choi, S. O. (2019). Analyzing the Stability of Underground Mines Using 3D Point Cloud Data and Discontinuum Numerical Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 1-20.
- Macciotta, R. (2021). Remote sensing applications for landslide monitoring and investigation in western canada. *Remote Sensing*, 1-23.
- Renishaw. (2014). *Cavity Auto-scanning Laser System Plan new projects*.
- Rusmansyah. (2009). Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Di Sub 7 dan Sub 8 Sebagai Lubang Undercut Untuk Metode Penambangan Underhand Cut & Fill di Daerah Kencana Oleh PT Nusa Halmahera Mineral Kabupaten Halmahera Utara Provinsi Maluku Utara. *Institut Teknologi Bandung*, 10-23.

- Slaker, B. A. (2015). Monitoring underground mine displacement using photogrammetry and laser scanning. *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 144.
- XI-ling, L., Xi-bing, L., Fa-bent, L., Guo-yan, Z., & Yu-hui, Q. (2008). 3D cavity detection technique and its application based on cavity auto scanning laser system. *Journal of Central South University of Technology*, 285-288.
- Zhenxiang, X. (1984). Tunnel Design Method Using Field Measurement Data. 221-229.



Optimalisasi Faktor Keamanan Lereng Deterministik dengan Menggunakan *Critical Failure Surface* pada Slide 6.0

Optimalization of Deterministic Safety Factor Using Critical Failure Surface in Slide 6.0

Hifni Satria Muwaffaqi

¹Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, KESDM
Email: muwaffaqis@yahoo.com

INFO ARTIKEL

Kata Kunci:

Kestabilan lereng, model statis, faktor keamanan, bidang gelincir.

ABSTRAK

Salah satu tujuan dari analisis kestabilan lereng tambang adalah untuk membuat lereng tambang yang aman pada saat proses penambangan. Hasil dari analisis kestabilan lereng umumnya dinyatakan dalam indeks faktor keamanan (*Safety Factor*) dan probabilitas kelongsoran (PK). Untuk menghitung faktor keamanan (FK) lereng menggunakan Metode Keseimbangan Batas yang memerlukan berbagai asumsi, salah satunya adalah letak bidang gelincir pada lereng. Bidang gelincir tersebut akan dibagi menjadi beberapa irisan yang kemudian dihitung faktor keamanannya. Lereng yang akan dianalisis memiliki geometri lebar jenjang 6.6 meter, tinggi 10 meter, dan sudut kemiringan jenjang 50° . Terdapat *ramp* dengan lebar 30.384 meter, tinggi *ramp* 10 meter, dan kemiringan jenjang *ramp* 50° . Didapatkan tinggi *overall slope* 173.454 meter. Permasalahannya adalah hasil analisis yang tidak mewakili lereng keseluruhan sehingga perlu adanya optimasi penentuan bidang gelincir melalui penambahan irisan hingga 45 irisan dalam satu bidang gelincir. Dari hasil optimasi luas bidang gelincir didapatkan $FK = 1.141$ dan $PK = 7\%$.

Keywords:

Slope stability, static model, factor of safety, slip surface.

One of the objectives of mine slope stability analysis is to create a safe mine slope during the mining process. The results of slope stability analysis are generally expressed in the factor of safety index and the probability of failure (PoF). Calculating the safety factor (FoS) for slopes using the Limit Equilibrium Method requires various assumptions, one of which is the location of the slip surface on the slope. The slip surface area will be divided into several slices and then the safety factor will be calculated. The slope that will be analysed has a geometric bench width of 6.6 meters, a bench height of 10 meters, and a slope angle of 50°. There is a ramp with a width of 30,384 meters, a ramp height of 10 meters, and a ramp slope of 50°. The overall slope height is 173,454 meters. The problem is that the analysis results do not represent the overall slope, so it is necessary to optimize the determination of the slip surface failure by adding slices of up to 45 slices in one slip surface. From the results of the optimization of the slip surface area, $FoS = 1,141$ and $PoF = 7\%$.

1. PENDAHULUAN**1.1. Latar Belakang**

Salah satu tujuan dari analisis kestabilan lereng tambang adalah untuk membuat lereng tambang yang aman pada saat proses penambangan. Hasil dari analisis kestabilan lereng umumnya dinyatakan dalam indeks faktor keamanan (*factor of safety*) dan probabilitas kelongsoran (Duncan, *et al.*, 2014). Penambahan beban pada lereng dan perubahan kekuatan geser material sewaktu-waktu dapat menyebabkan perubahan nilai faktor keamanan

lereng (Duncan, *et al.*, 2014). Faktor keamanan lereng dihitung berdasarkan jumlah gaya penahan dibagi dengan jumlah gaya pendorong (Duncan, *et al.*, 2014). Apabila nilai $FK > 1$, maka jumlah gaya penahan lebih banyak daripada gaya pendorong sehingga lereng dinyatakan stabil. Sedangkan, jika nilai $FK < 1$, maka jumlah gaya pendorong lebih besar daripada gaya penahan yang mengakibatkan lereng longsor (Arif, 2016). Menurut Pratama *et al* (2014), rancangan geoteknik lereng biasanya dinyatakan dalam bentuk parameter-parameter

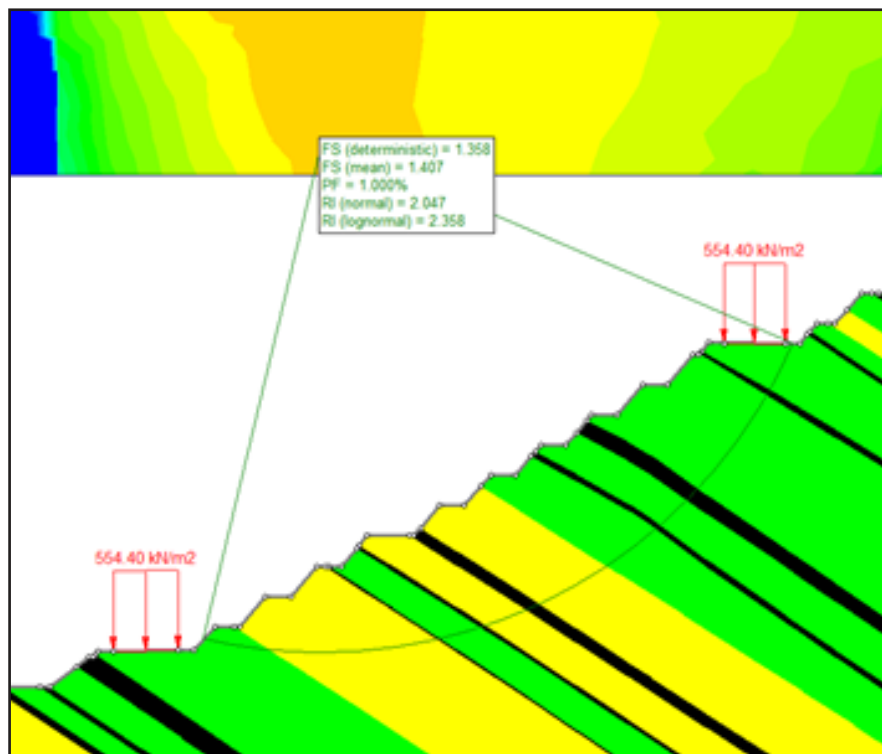
di antaranya:

- Lereng yang terlalu tinggi cenderung mudah longsor dibanding lereng yang tidak terlalu tinggi dengan jenis material yang sama.
- Semakin besar sudut kemiringan lerengnya maka lereng tersebut semakin tidak stabil.
- Semakin lebar *berm*, maka lereng akan semakin stabil.

Faktor-faktor tersebut perlu dipertimbangkan untuk meminimalisir kemungkinan kelongsoran. Longsor dapat terjadi karena terganggunya *state of equilibrium* lereng akibat pengaruh gaya-gaya yang berasal

dari dalam lereng seperti gaya gravitasi bumi, tekanan air pori dalam tanah atau lereng, dan gaya dari luar lereng seperti *ground vibration* dan beban kendaraan (Amri, *et al.*, 2021). Oleh karena itu, faktor-faktor ini perlu mendapatkan perhatian agar kondisi lereng dapat dijaga kestabilannya (Arif, 2016).

Dalam melakukan analisis kestabilan lereng, umumnya digunakan Metode Kestimbangan Batas (*limit equilibrium method*) yang mengasumsikan lereng tidak mengalami deformasi dan *displacement*, sehingga untuk mendapatkan nilai faktor

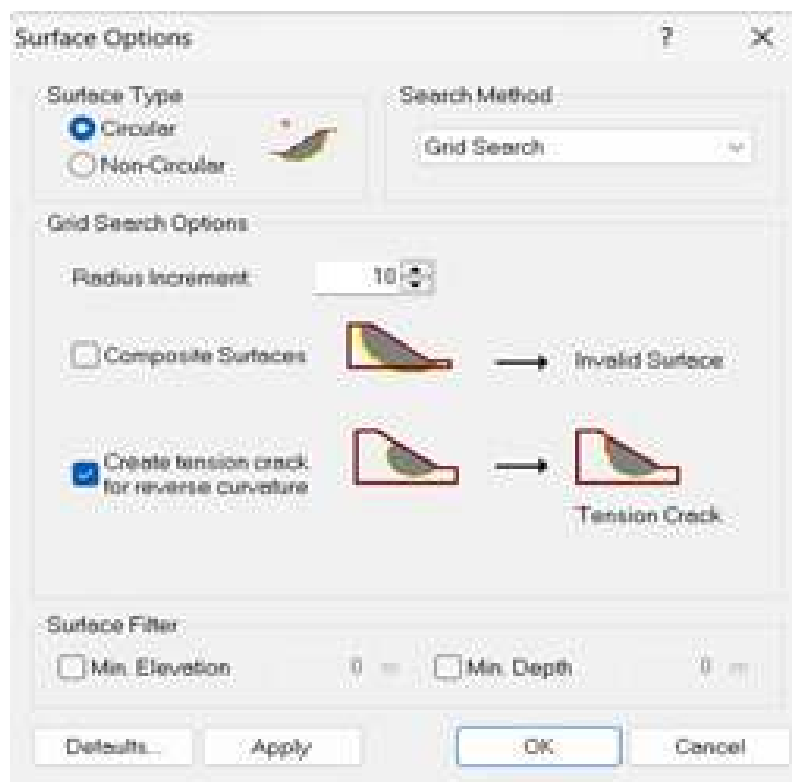


Gambar 1.1 Circular Grid Slip Surface Pada Software SLIDE v6.0

keamanan lereng tidak diperlukan faktor gaya tegangan dan regangan material (Matthews, *et al.*, 2014). Pada Metode Kesetimbangan Batas, diperlukan asumsi bentuk bidang gelincir (*slip surface*) pada lereng untuk mencari nilai faktor keamanan yang paling kritis. Tanpa adanya bidang gelincir, maka tidak akan diketahui faktor keamanan lereng. Berbagai *software* yang tersedia seperti SLIDE yang dikembangkan oleh Rocscience untuk analisis kestabilan lereng mampu mengidentifikasi bidang gelincir dan menghitung nilai faktor keamanan secara cepat dan mudah. Namun,

pada saat melakukan analisis, umumnya *software* masih menggunakan pengaturan secara *default* dalam mencari bidang gelincir untuk menghitung nilai faktor keamanan lereng. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil analisis bidang gelincir yang telah dioptimasi dengan bidang gelincir *default* pada *software* SLIDE v6.0.

Pada Gambar 1.1, merupakan hasil analisis kestabilan lereng dengan bidang gelincir *circular*, adapun litologi yang menyusun lereng pada hasil analisis tersebut adalah *sandstone* dengan warna litologi kuning, *claystone* dengan



Gambar 1.2 *Surface Options* pada *Software* Rocscience SLIDE v6.0 (Dok. Pribadi)

warna litologi hijau, dan *coal* dengan warna litologi hitam. Adapun pada lereng tersebut diberi pembebanan alat berat dengan notasi panah berwarna merah sebesar 554.40 kN/m².

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membahas dasar-dasar pemilihan dan cara optimasi bidang gelincir dengan pencarian *grid* agar mendapatkan FK yang optimal pada Metode Kesetimbangan Batas di *software* Rocscience SLIDE 6.0. Pembahasan hanya berfokus pada tipe bidang gelincir *circular* (*circular surface type*) dengan metode pencarian “*Grid Search*” seperti pada Gambar 1.2.

Penelitian kali ini dilakukan pada desain lereng yang materialnya dominan tersusun atas batuan sedimen, seperti batubara dengan litologi yang berwarna hitam, batupasir dengan litologi berwarna kuning, batulanau dengan litologi berwarna hijau tua, dan batulempung dengan litologi berwarna hijau muda. Adapun kondisi yang digunakan pada pengujian kali ini adalah:

1. Lereng dianalisis dengan kondisi *surface water 8x slope height*.
2. Lereng dikenai beban peralatan mekanis dan getaran (*seismic*).
3. Perhitungan Probabilitas Kelongsoran (PK) bersifat *default*

2. METODOLOGI

2.1. Tahap Pengumpulan Data

Dalam tahapan ini, data yang dikumpulkan dibedakan menjadi data primer dan data sekunder dengan rincian sebagai berikut.

1. Data Primer adalah sebuah data yang langsung didapatkan dari sumber dan diberi kepada pengumpul data atau peneliti (Sugiyono, 2016). Adapun cara untuk mendapatkan data tersebut dapat melalui wawancara dengan subjek penelitian baik secara observasi ataupun pengamatan langsung. Berdasarkan pengertian tersebut, data primer dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Geometri lereng
- b. Desain lereng
- c. Data sifat fisik berupa bobot isi material () dan sifat mekanik material penyusun lereng berupa kohesi (c), sudut geser dalam ()
- d. Data Sekunder adalah data yang sudah diolah terlebih dahulu dan baru didapatkan oleh peneliti dari sumber di luar instansi yang sedang diteliti, seperti dari jurnal, publikasi, atau dokumen standarisasi. Adapun data sekunder dalam penelitian ini adalah data geologi lokasi penambangan

2.2. Tahap Analisis dan Pengolahan Data

Tahap pengolahan data terlebih dahulu

dimulai dengan mengklasifikasikan faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng dan dilanjutkan dengan menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhinya. Kemudian dilanjutkan dengan membuat model penampang lereng, pemilihan bidang gelincir (*slip surface*), dan pemilihan metode analisis kestabilan lereng berupa *Morgenstern-Price*. Dalam metode ini, terdapat hubungan rasio antara gaya geser antar irisan dengan gaya normal antar irisan yang didapatkan dari fungsi tertentu (Morgenstern & Price, 1965). Pada metode ini analisis faktor keamanan dilakukan dengan dua prinsip yaitu Kesetimbangan Momen (F_m) dan Kesetimbangan Gaya (F_p). Pada proses iterasi pertama, gaya geser di sekitar irisan diasumsikan nol. Kemudian gaya geser tersebut dihitung dengan mengasumsikan nilai λ dan $f(x)$ (Abramson, Lee, Sharma, & Boyce, 2004).

Setelah pemodelan lereng selesai, dilanjutkan penambahan *material properties* yang telah dikelompokkan. Data material penyusun lereng yang ada di pemodelan Gambar 1.1. dibedakan menjadi *sandstone*, *siltstone*, *claystone*, dan *coal*. Dari data material tersebut akan dibedakan dengan fitur *material boundary* yang berada di *software* SLIDE untuk selanjutnya dilakukan komputasi dan interpretasi sehingga mendapatkan nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran lereng.

Hasil dari analisis kestabilan lereng berupa

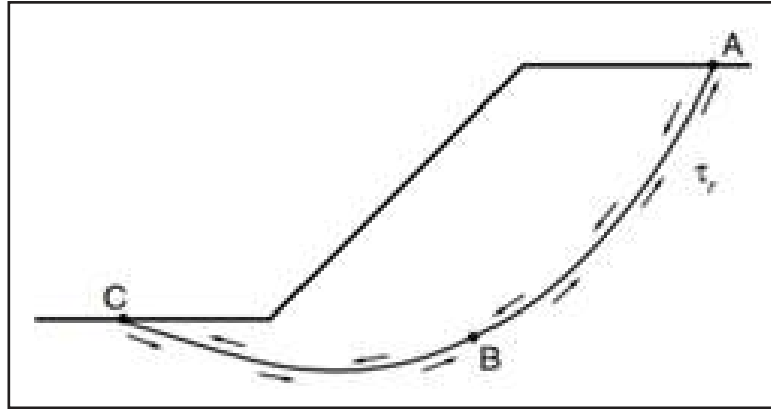
nilai faktor keamanan deterministic dan mean (FK) serta probabilitas kelongsoran (PK) yang digunakan sebagai basis untuk menilai kondisi dari desain lereng. Apabila nilai FK dan PK lereng tidak sesuai dengan standar yang ada, yaitu pada Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827K/30/MEM/2018 yang terletak pada Lampiran II tentang Pedoman Pengelolaan Teknis Pertambangan di halaman 57, maka dilakukan usaha untuk meningkatkan nilai faktor keamanan lereng dengan memberikan rekomendasi geoteknik.

Pada metode analisis secara deterministik, terdapat ketidakpastian dalam estimasi faktor keamanan (Giani, 1992). Ketidakpastian yang pertama disebabkan oleh variabilitas spasial dari material penyusun lereng dan ketidakpastian dalam pengukuran *material properties* (*properties measurement*). Ketidakpastian berikutnya terkait dengan tingkat kepercayaan (*reliability*) dari hipotesis yang digunakan dalam pemodelan lereng (Duncan, 2001).

Adapun untuk menyelesaikan masalah pada penelitian ini akan dibantu dengan berbagai perangkat lunak seperti *SLIDE* sebagai *software* untuk menganalisis kestabilan lereng,

2.3. Penentuan Bidang Gelincir Longsoran (*Failure Slip Surface*)

Salah satu aspek terpenting dalam analisis kestabilan lereng dengan metode kesetimbangan



Gambar 2.2 Bidang Gelincir Lereng Berbentuk Busur pada Analisis Kesetimbangan Batas (Das & Sobhan, 2018)

batas adalah menentukan permukaan bidang gelincir kritis yang memiliki faktor keamanan terendah. Tetapi, *setting* dan metodologi dalam *software* sering kali tidak dioptimalkan untuk melakukan pencarian permukaan bidang gelincir kritis seperti yang seharusnya. Menurut hasil riset pengembang *software* Rocscience (2016), untuk mencegah terjadinya salah interpretasi, Rocscience (2016) menyatakan bahwa perlu adanya peninjauan ulang pada saat melakukan pencarian bidang gelincir agar tidak terjadi kesalahan dalam hasil perhitungan nantinya.

Secara metodologi, menurut Krahn (2022), untuk melakukan analisis kestabilan lereng dengan metode kesetimbangan batas, terdapat berbagai asumsi yang digunakan seperti:

1. Untuk menghitung faktor keamanan lereng diperlukan asumsi letak *slip surface* yang membentuk bidang longsoran pada lereng,

2. Bidang gelincir akan dibagi menjadi beberapa irisan dan masing-masing irisan memiliki nilai faktor keamanan yang sama,
3. Seluruh tipe longsoran diasumsikan mengalami longsoran geser yang bergerak di sepanjang *slip surface* seperti pada Gambar 2.2.

Masing-masing irisan diasumsikan mengalami gaya normal dan gaya geser yang bekerja antar irisan (Wyllie & Mah, 2018). Untuk sistematika pembuatan irisan dilakukan secara otomatis oleh *software*.

Pada analisis kestabilan lereng dengan Metode Kesetimbangan Batas kali ini akan berfokus pada bidang gelincir yang berbentuk busur seperti pada Gambar 2.2, pada bagian A merupakan *entry slip surface*, di mana diasumsikan bidang gelincir pada bagian *crest* mulai terbentuk, sedangkan pada bagian B merupakan titik di mana bidang gelincir

akan menggeser berlawanan arah dengan arah tahanan geser material, dan pada bagian C merupakan *exit slip surface* di mana akhir dari bidang gelincir yang terbentuk pada lereng. Adapun cara kerja dari *software* ini adalah dengan cara melakukan pencarian secara otomatis pada lereng untuk menentukan area lereng yang memiliki bidang gelincir dengan FK paling rendah (Duncan, Wright, & Brandon, Soil Strength and Slope Stability, 2014). Pada dasarnya, bidang gelincir yang terbentuk pada lereng melalui pemodelan *software* bukanlah bidang longsor absolut yang sifatnya pasti akan terjadi longsor di area tersebut. Sebaliknya, hasil dari bidang gelincir tersebut perlu diverifikasi dengan mengoptimasi pencarian bidang gelincir dan mengobservasi lereng secara kontinu di lapangan.

2.4. Metode Kesetimbangan Batas

Untuk menghitung faktor keamanan lereng menggunakan Metode Kesetimbangan Batas, perlu menentukan letak area bidang gelincir (*slip surface*) terlebih dahulu pada lereng yang akan dianalisis seperti pada Gambar 2.2. Apabila menggunakan *software*, letak bidang gelincir akan ditentukan secara *iteration* hingga ribuan kali, artinya *software* akan melakukan perhitungan berulang pada lereng hingga mendapatkan letak bidang gelincir dengan FK terendah (Rocscience, 2016). Pada bidang gelincir akan dibagi menjadi beberapa irisan

yang mengisi area lereng tersebut. Masing-masing irisan pada bidang gelincir tersebut akan dihitung nilai faktor keamanannya berdasarkan kekuatan geser material dan gaya-gaya yang bekerja pada lereng tersebut.

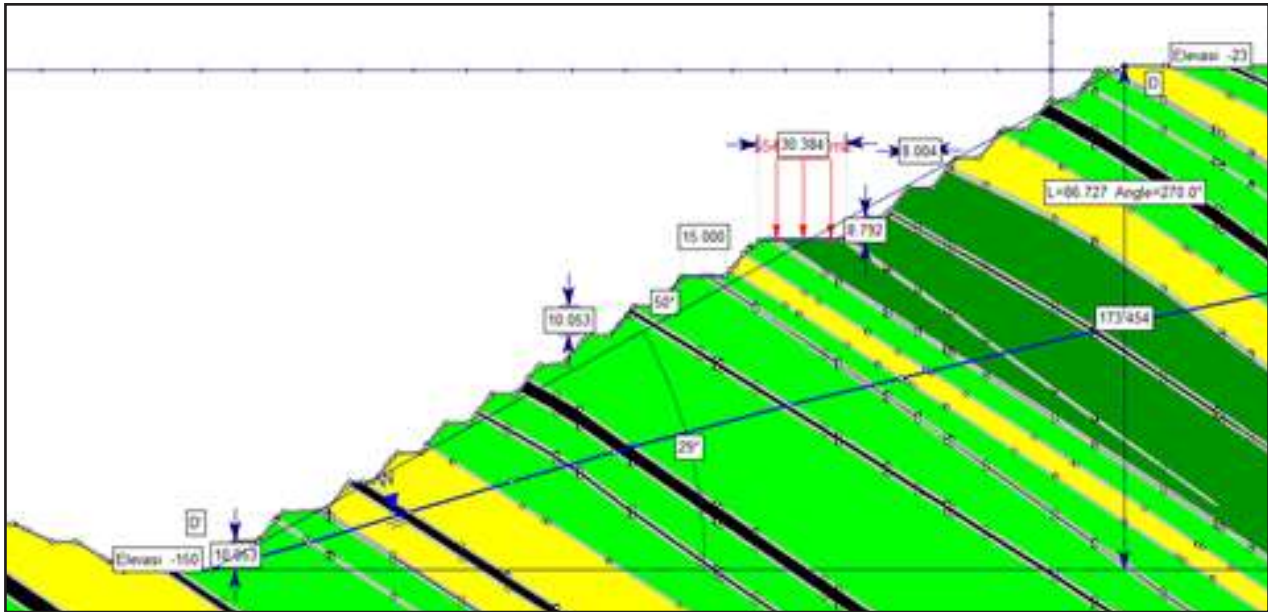
Pada metode ini, nilai FK masing-masing irisan dianggap sama dan akan menjadi nilai yang merepresentasikan seluruh irisan atau seluruh area bidang gelincir sehingga disebut dengan analisis deterministik. Untuk memperbesar luasan area bidang gelincir dapat dilakukan penambahan jumlah irisan pada pengaturan *software* daripada menggunakan pengaturan secara *default* yang biasanya kurang efektif dalam menganalisis *large-scale slope model*.

3. HASIL

3.1. Geometri Lereng

Pengujian *default grid slip surface* dengan *optimized grid slip surface* kali ini dilakukan pada lereng *highwall*. Lereng *highwall* merupakan bagian lereng pada tambang terbuka yang kemiringannya didesain memotong secara tegak lurus (*perpendicular*) atau berlawanan arah dengan kemiringan bidang perlapisan batuan Model lereng yang digunakan untuk pengujian kali ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Penjelasan litologi pada Gambar 3.1 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Model Lereng Rencana

Tabel 3.1 Keterangan Litologi Model Lereng

| Material | Warna | Parameter | Nilai <i>Material Properties</i> |
|------------------|-------|---|----------------------------------|
| <i>Claystone</i> | | Kohesi (kPa) | 116.47 |
| | | Sudut Geser Dalam (°) | 21.62 |
| | | <i>Unit Weight</i> (kN/m ³) | 14.14 |
| <i>Coal</i> | | Kohesi (kPa) | 168.75 |
| | | Sudut Geser Dalam (°) | 24.85 |
| | | <i>Unit Weight</i> (kN/m ³) | 17.63 |
| <i>Siltstone</i> | | Kohesi (kPa) | 117.14 |
| | | Sudut Geser Dalam (°) | 26.10 |
| | | <i>Unit Weight</i> (kN/m ³) | 14.95 |
| <i>Sandstone</i> | | Kohesi (kPa) | 136.12 |
| | | Sudut Geser Dalam (°) | 19.45 |
| | | <i>Unit Weight</i> (kN/m ³) | 14.14 |

Tabel 3.2 Geometri Model Lereng Rencana

| <i>Section</i> | Lokasi Lereng | Bagian Lereng | Sudut (°) | Lebar (m) | Tinggi (m) |
|---------------------|------------------|----------------------|-----------|-----------|------------|
| <i>Section A-A'</i> | <i>High Wall</i> | <i>Bench</i> | 50 | 6.6 | 10 |
| | | <i>Wider Bench</i> | 50 | 15 | 10 |
| | | <i>Ramp</i> | 50 | 30.384 | 10 |
| | | <i>Overall Slope</i> | 29 | - | 173.454 |

Adapun rincian geometri lereng tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2.

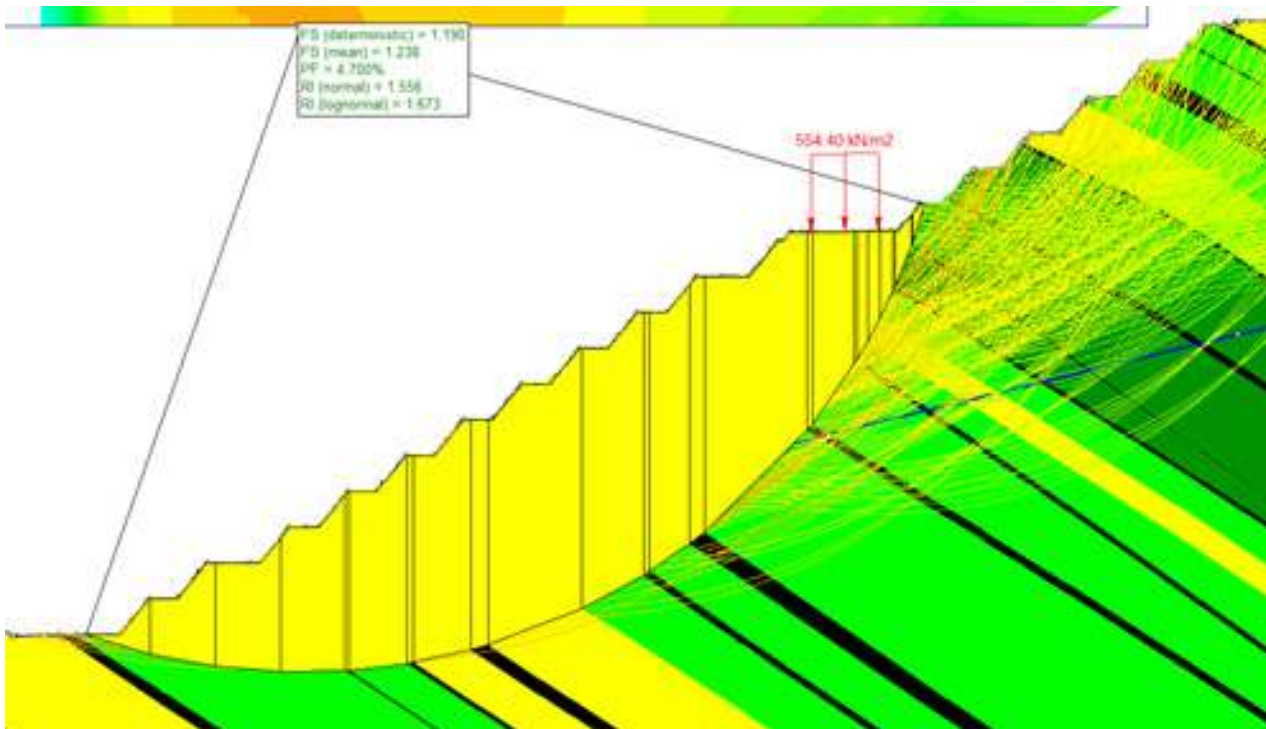
3.2. Faktor Keamanan (FK) Lereng dengan *Default Slip Surface*

Pada percobaan pertama, lereng dianalisis menggunakan Metode Kesetimbangan Batas *Morgenstern-Price*. Metode ini menghitung faktor keamanan lereng dengan memperhatikan kesetimbangan gaya horizontal dan gaya vertikal serta kesetimbangan momen. Lereng

yang dianalisis dominan terdiri dari material batuan sedimen dan tanpa mempertimbangkan geologi struktur yang ada, sehingga menggunakan *circular slip surface*. Adapun konfigurasi bidang gelincirnya menggunakan aturan *default by system*. Hasil perhitungan Faktor Keamanan lereng secara deterministik dengan menggunakan *default circular slip surface* dapat dilihat pada Tabel 3.3. Sedangkan untuk hasil analisis model dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Tabel 3.3 Hasil Perhitungan FK dengan *Default Circular Slip Surface*

| Tipe Longsoran | Jumlah Irisan | Model Lereng | Kondisi Water Table | FK | PK (%) |
|-----------------------|---------------|--------------|-------------------------------|-------|--------|
| Circular Slip Surface | 25 | Highwall | Surface Water 8x Slope Height | 1.190 | 4.7 |



Gambar 3.2 Hasil Analisis Lereng dengan *Default Circular Slip Surface*

Pada Gambar 3.2 dapat dilihat balok (warna kuning) yang tegak lurus dengan arah bidang perlapisan batuan berjumlah 25 irisan. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil analisis untuk percobaan pertama menggunakan *default setting* menghasilkan bidang gelincir yang dibagi menjadi 25 irisan. Adapun garis-garis berwarna yang bentuknya seperti lengkungan busur adalah bidang gelincir yang telah dihitung dengan cara *iteration* atau perhitungan ulang.

3.3. Faktor Keamanan (FK) Lereng dengan *Optimized Slip Surface*

Pada percobaan kedua, lereng dianalisis menggunakan *optimized circular slip surface* dengan metode perhitungan yang sama. Adapun untuk menentukan letak bidang gelincirnya menggunakan *setting* yang dimodifikasi dengan menambahkan jumlah irisan untuk mendapatkan letak bidang gelincir yang optimal. Jumlah irisan pada bidang gelincir

Tabel 3.4 Hasil Perhitungan FK dengan *Optimized Circular Slip Surface*

| Tipe Longsoran | Jumlah Irisan | Model Lereng | Kondisi | FK | PK (%) |
|------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------|---------------|
| <i>Circular Slip Surface</i> | 30 | <i>Highwall</i> | <i>Surface Water 8x Slope Height</i> | 1.185 | 5.2 |
| <i>Circular Slip Surface</i> | 35 | <i>Highwall</i> | <i>Surface Water 8x Slope Height</i> | 1.155 | 6.6 |
| <i>Circular Slip Surface</i> | 40 | <i>Highwall</i> | <i>Surface Water 8x Slope Height</i> | 1.141 | 7 |
| <i>Circular Slip Surface</i> | 45 | <i>Highwall</i> | <i>Surface Water 8x Slope Height</i> | 1.141 | 7 |
| <i>Circular Slip Surface</i> | 50 | <i>Highwall</i> | <i>Surface Water 8x Slope Height</i> | 1.141 | 7 |

akan ditambah sebanyak kelipatan 5 hingga letak bidang gelincir mampu merepresentasikan *overall slope*. Hasil perhitungan Faktor Keamanan lereng secara deterministik dengan menggunakan *optimized circular slip surface* dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin bertambah jumlah irisan, maka nilai Faktor Keamanan (FK) berangsur-angsur menurun dan menyebabkan bertambahnya probabilitas kelongsoran secara eksponen. Hal ini disebabkan karena bidang gelincir yang terbentuk semakin luas mewakili *overall slope*, sehingga menyebabkan perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada lereng semakin besar.

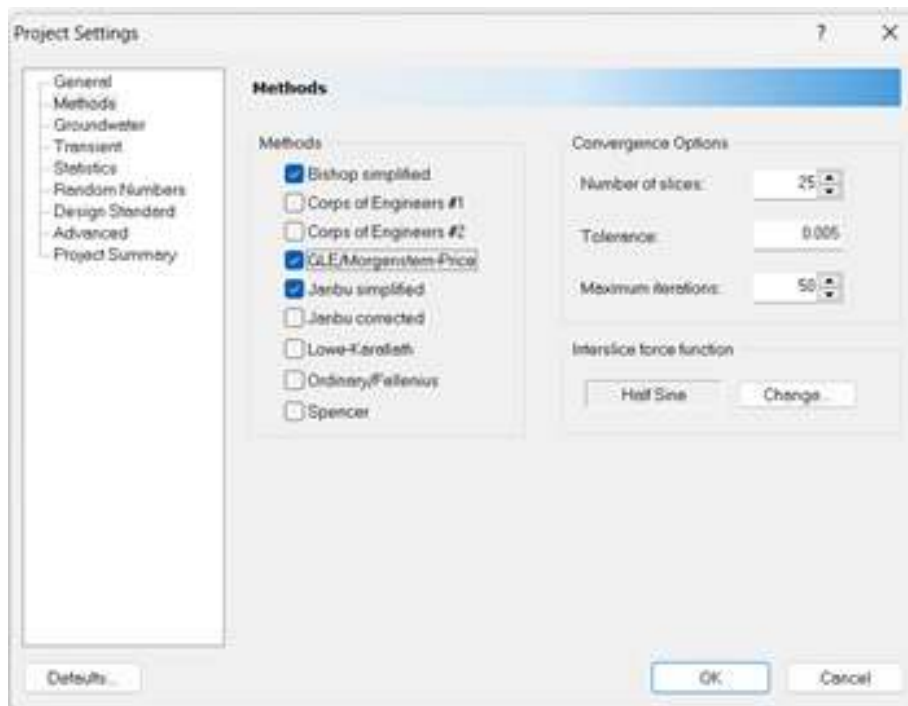
4. PEMBAHASAN

Bidang gelincir pada Metode Kesetimbangan Batas dibagi menjadi beberapa irisan yang masing-masing dihitung nilai faktor keamanannya. Semakin banyak jumlah irisan, maka semakin besar bidang gelincir yang terbentuk untuk menghitung faktor keamanan lereng keseluruhan (*overall slope*). Apabila akan menganalisis lereng keseluruhan yang terdiri dari beberapa jenjang (*multi bench*) dengan dimensi yang sangat luas, maka perlu memperhatikan jumlah irisan dan bidang gelincir yang terbentuk hingga keseluruhan lereng dapat dihitung kestabilannya. Seperti pada Gambar 3.2, bidang gelincir yang

Tabel 4.1 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang

| Jenis Lereng | Keparahan Longsor (<i>Consequences of Failure/CoF</i>) | Kriteria dapat diterima (<i>Acceptance Criteria</i>) | | |
|--------------------|--|--|------------------------------------|---|
| | | Faktor Keamanan (FK) Statis (Min) | Faktor Keamanan (FK) Dinamis (Min) | Probabilitas Longsor (<i>Probability of Failure</i>) (maks) PoF (FK \leq 1) |
| Lereng Tunggal | Rendah s.d. Tinggi | 1.1 | Tidak ada | 25-50% |
| Inter-ramp | Rendah | 1.15-1.2 | 1.0 | 25% |
| | Menengah | 1.2-1.3 | 1.0 | 20% |
| | Tinggi | 1.2-1.3 | 1.1 | 10% |
| Lereng Keseluruhan | Rendah | 1.2-1.3 | 1.0 | 15-20% |
| | Menengah | 1.3 | 1.05 | 10% |
| | Tinggi | 1.3-1.5 | 1.1 | 5% |

(Sumber: Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018, 2018, hlm. 57).



Gambar 4.1 Menambah Jumlah Irisan pada *Software* SLIDE

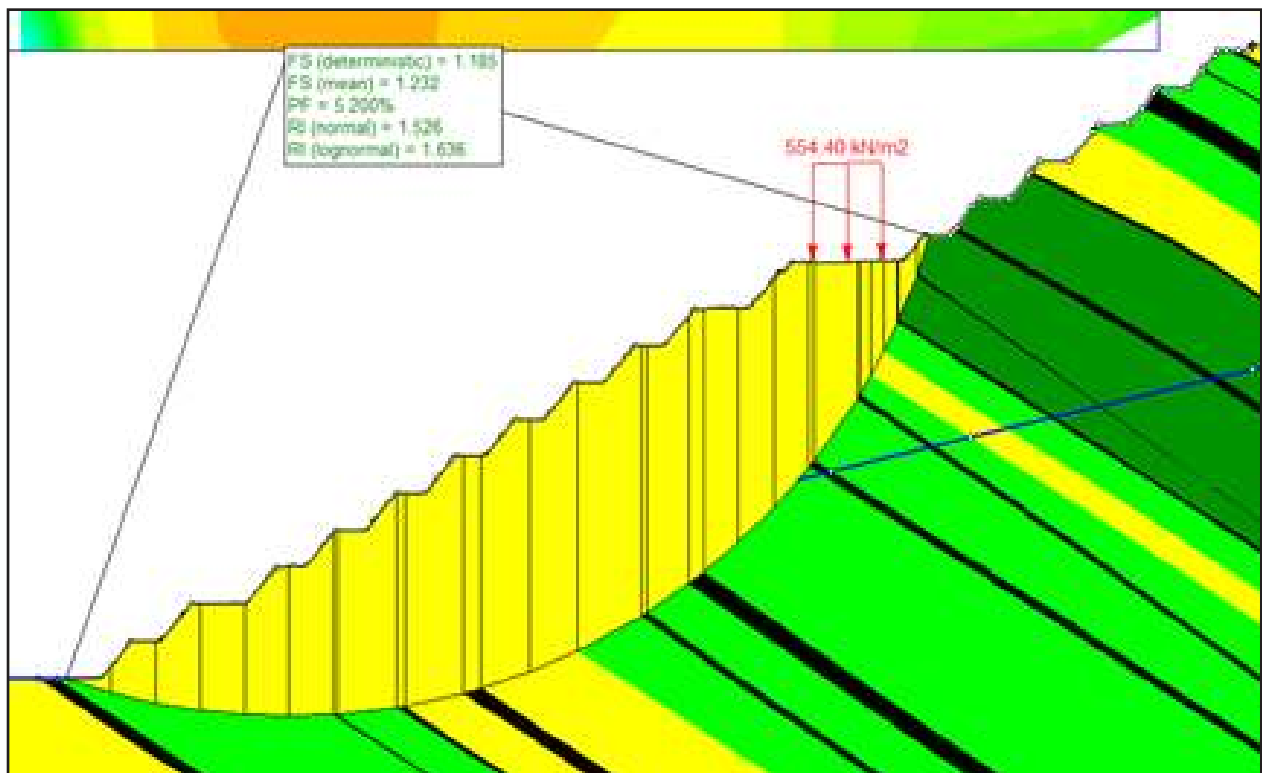
teridentifikasi hanya pada bagian jenjang lereng (*bench*) dengan jumlah irisan 25 bagian. Sedangkan pada analisis lereng skala besar, diperlukan kestabilan hingga lereng keseluruhan dengan standar nilai faktor keamanan lereng seperti pada Tabel 4.1 yang mengacu pada Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik

Prosedur untuk menambah irisan pada bidang gelincir melalui *software* SLIDE

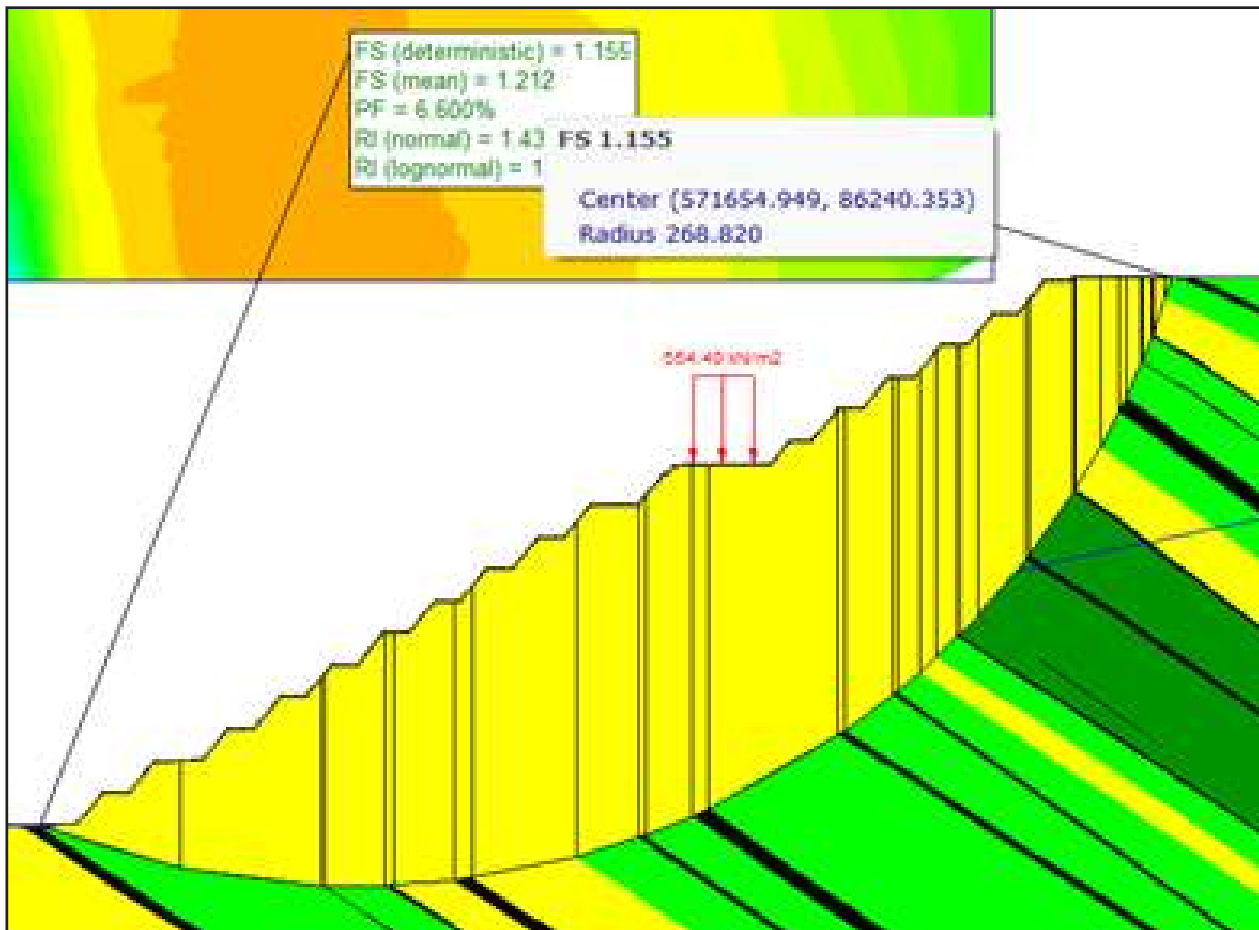
6.0 dapat dilihat pada Gambar 4.1. Sebagai *default setting*, jumlah irisan (*number of slices*) sebanyak 25 bagian. Pada kolom tersebut akan diubah dengan kelipatan 5 angka hingga mencapai letak bidang gelincir yang optimal.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan optimasi pencarian bidang gelincir dengan cara menambah jumlah irisan setiap kali menganalisis lereng skala besar. Hasil dari penambahan jumlah irisan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2 hingga Gambar 4.5

. Pada Gambar 4.2 jumlah irisan diubah



Gambar 4.2 Hasil Analisis Optimasi Bidang Gelincir dengan 30 Irisan



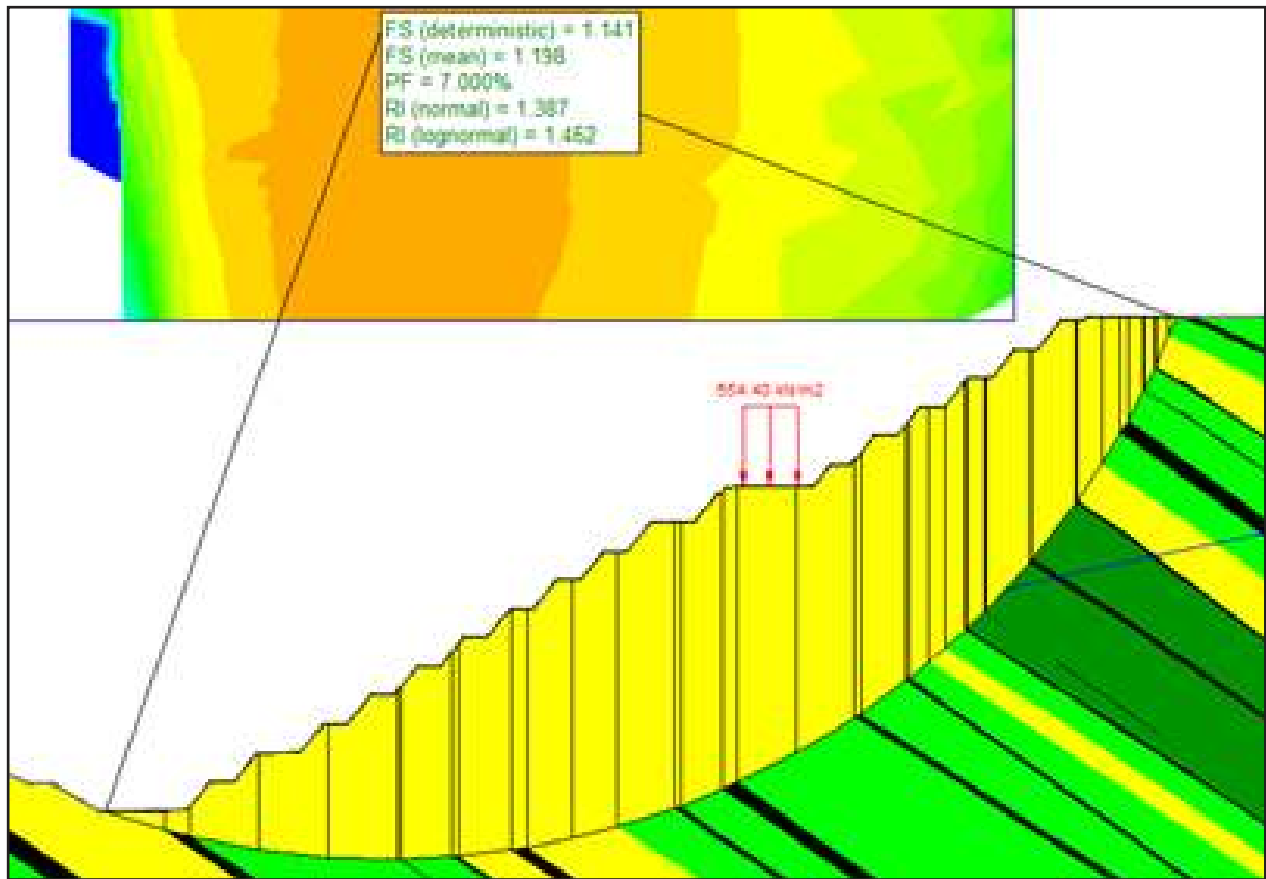
Gambar 4.3 Hasil Analisis Optimasi Bidang Gelincir dengan 35 Irisan

menjadi 30 bagian. Namun, tidak ada perubahan bentuk bidang gelincir dikarenakan masih belum optimal.

Pada Gambar 4.3 jumlah irisan diubah menjadi 35 bagian. Jumlah tersebut telah berhasil mengidentifikasi bidang gelincir lereng secara keseluruhan dengan nilai faktor keamanan terendah. Namun proses analisis

tidak berhenti pada 35 irisan. Hal ini perlu dilanjutkan hingga didapatkan nilai faktor keamanan yang konstan atau telah ditemukan bidang gelincir yang paling kritis.

Pada Gambar 4.4 jumlah irisan diubah menjadi 40 bagian. Jumlah tersebut telah berhasil mengidentifikasi bidang gelincir lereng secara keseluruhan dengan nilai faktor



Gambar 4.4 Hasil Analisis Optimasi Bidang Gelincir dengan 40 Irisan

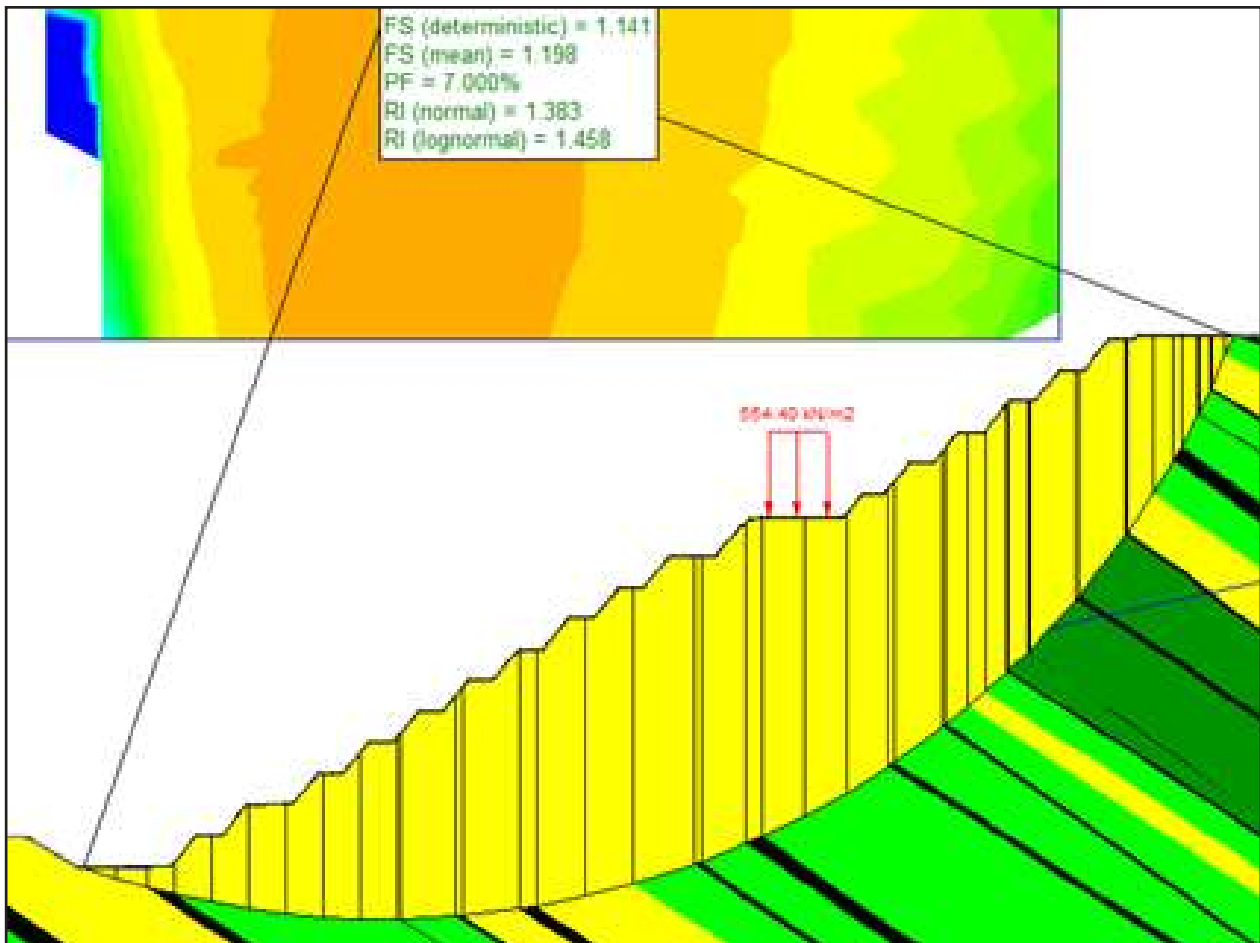
keamanan terendah. Untuk mengetahui kemungkinan lebih lanjut tentang penurunan nilai faktor keamanan, maka akan ditambah lagi menjadi 45 irisan seperti pada Gambar 4.5.

Pada Gambar 4.5 jumlah irisan diubah menjadi 45 bagian. Dari hasil analisis tersebut, tidak ditemukan adanya penurunan nilai faktor keamanan dan peningkatan nilai probabilitas kelongsoran. Hal ini mengindikasikan bahwa bidang gelincir dengan 45 irisan menjadi bidang

gelincir yang optimal untuk lereng secara keseluruhan. Dengan tidak adanya penurunan faktor keamanan secara signifikan, maka dapat dipastikan hasil analisis telah mencapai titik optimal.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian optimalisasi perhitungan faktor keamanan lereng menggunakan bidang gelincir *circular*



Gambar 4.5 Hasil Analisis Optimasi Bidang Gelincir dengan 45 Irisan

didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk menganalisis lereng skala besar diperlukan bidang gelincir yang mewakili lereng keseluruhan guna mendapatkan nilai faktor keamanan terendah sebagai upaya mencegah terjadinya kesalahan analisis.
2. Untuk memperbesar area bidang gelincir pada saat analisis kestabilan lereng skala besar dengan Metode Kestimbangan Batas dapat dilakukan dengan cara menambah jumlah irisan.

3. Hasil analisis menunjukkan bahwa bidang gelincir yang telah dioptimalisasi memiliki nilai faktor keamanan terendah yaitu 1.141 dan probabilitas kelongsoran sebesar 7% dengan jumlah irisan sebanyak 45 bagian.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2004). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Amri, N., Dharmawansyah, D., & Hermansyah, H. (2021). Perbandingan Metode Bishop dan Janbu dalam Analisis Stabilitas Lereng pada Oprit Jembatan Labu Sawo Sumbawa. *Journal of Civil Engineering and Planning (JCEP)*, 20-33.
- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering*. United States of America: Cengage Learning.
- Duncan, J. M. (2001). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Volume 126*, 307-316.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. Canada: John Wiley & Sons.
- Giani, G. P. (1992). *Rock Slope Stability Analysis*. CRC Press.
- Helm, A. P., Carol, M., & Farook, Z. (2014). Slope Stability Analysis - Limit Equilibrium or The Finite Element Method? *Newcastle University Ground Engineering*, 1-7.
- Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. (2018). Jakarta: Indonesia.
- Krahn, J. (2022). *Stability Modelling with SLOPE/W. An Engineering Methodology*. GeoSlope International.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, 15:79-93.
- Pratama, R. B., Muhibbi, I. M., Atmanto, I. D., & Hardiyati, S. (2014). ANALISIS STABILITAS LERENG DAN ALTERNATIF PENANGANANNYA (STUDI KASUS LONGSORAN JALAN ALTERNATIF TAWANGMANGU STA 3+150 – STA 3+200, KARANGANYAR).

Volume 3.

Rocscience. (2016). Critical Slip Surface Search Methods in Slide 7.0. *Rocscience*, 1-28.

Sugiyono. (2016). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D.*

Bandung: PT Alfabet.

Wyllie, D. C., & Mah, C. (2018). *Rock Slope Engineering Civil Applications Fifth Edition.* New York: Taylor & Francis Group.



Struktur Tegakan dan Tingkat Keberhasilan Area Reklamasi pada Tambang Silika

Stand Structure and Success Level of Reclamation Areas at Silica Mines

Tedi Yunanto, Dadan Wildan, Suparno

Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, KESDM

Corresponding Author: tedi.yunanto@esdm.go.id

INFO ARTIKEL

ABSTRAK

Kata Kunci:

struktur tegakan, tingkat keberhasilan, reklamasi, tambang silika

Sebagai negara berkembang, Indonesia masih bergantung terhadap eksploitasi sumber daya alam untuk sumber pendapatan nasional, seperti komoditas tambang Silika di Kabupaten Sukabumi. Untuk mengembalikan fungsi lahan bekas tambang sesuai peruntukannya, maka area bekas tambang wajib dilakukan kegiatan reklamasi. Dinamika ekologi khususnya struktur tegakan terjadi pada area reklamasi dan area reklamasi tersebut harus memenuhi kriteria keberhasilan berdasarkan peraturan perundangan yang berlaku. Tujuan penelitian adalah untuk memahami dinamika ekologi pada area reklamasi bekas tambang silika dan mengukur tingkat keberhasilan reklamasi sesuai peraturan perundangan. Penelitian dilaksanakan pada area reklamasi tambang silika dengan plot lingkaran jari-jari (r) 17,8 m (0,1 ha) sebanyak 10 plot (± 1 ha). Secara umum, rata-rata diameter pohon di areal reklamasi pada semua plot adalah 18,70 cm (aritmatika) dan 18,99 cm (kuadrat). Grafik yang dibentuk dari hubungan jumlah pohon dengan kelas

diameter dibagi menjadi tiga bentuk, yaitu J-shape terbalik, kurva sebaran normal yang tidak sempurna dan kurva sebaran normal yang sempurna. Rata-rata tinggi total untuk semua plot adalah 11.87 m untuk aritmatika dan 12.25 m untuk Lorey's. Hasil sampling dari 10 plot lingkaran (1 ha) didapatkan bahwa area reklamasi tersebut mencapai tingkat keberhasilan 96,40%. Beberapa parameter kriteria keberhasilan yang belum terpenuhi diantaranya adalah jumlah tanaman, penutupan cover crop dan tajuk. Terdapat jenis puspa (*Schima wallichii*) yang tumbuh alami pada area reklamasi dan dapat ditemukan pada plot 2, 5, 6, 7 dan 8. Untuk meningkat keanekaragaman perlu dilakukan proses pengayaan, yaitu menanam jenis tanaman lainnya.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:
stand structure, level of success, reclamation, silica mine

As a developing country, Indonesia still depends on the exploitation of natural resources as a source of national income, such as the Silica mining commodity in Sukabumi Regency. To restore the function of ex-mining land according to its intended use, reclamation activities must be carried out in ex-mining areas. Ecological dynamics, especially stand structure, occur in the reclamation area and the reclamation area must meet the success criteria based on applicable laws and regulations. The aim of the research is to understand the ecological dynamics in the reclamation area of the former silica mine and measure the level of success of reclamation in accordance with statutory regulations. The research was carried out in a silica mine reclamation with a circle plot with a radius (r) of 17.8m (0.1 ha) totalling 10 plots (± 1 ha). In general, the mean tree diameter in the reclamation area in all plots is 18.70 cm (arithmetic) and 18.99 cm (square). The graph formed from the relationship between the number of trees and the diameter class is divided into three shapes, namely the inverted J-shape, the imperfect normal distribution curve and the perfect normal distribution curve. The

*mean total height for all plots was 11.87 m for arithmetic and 12.25 m for Lorey's. Sampling results from 10 circular plots (1 ha) showed that the reclamation area achieved a success rate of 96.40%. Several success criteria parameters that have not been met include the number of plants, cover of crop cover and canopy. There is a species of Puspa (*Schima wallichii*) that grows naturally in the reclamation area and can be found in plots 2, 5, 6, 7 and 8. To increase diversity it is necessary to carry out an enrichment process, namely planting other species of plants.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai Negara berkembang masih bergantung terhadap eksploitasi sumber daya alam untuk sumber pendapatan nasional. Komoditas tambang merupakan salah satu sumber daya alam yang dieksploitasi, seperti pertambangan silika di Kabupaten Sukabumi. Dampak lingkungan akibat pertambangan diantaranya adalah perubahan bentang alam, lubang tambang (*void*), menurunnya biodiversitas flora dan fauna, serta berubahnya kondisi tanah (Lloyd *et al.*, 2002; Doupe and Lymbery, 2005; Slingenberg *et al.*, 2009; and Subowo, 2011).

Untuk mengurangi kerusakan lingkungan akibat kegiatan penambangan pada tahap eksplorasi atau eksploitasi, maka wilayah bekas pertambangan harus dilakukan kegiatan reklamasi. Kegiatan reklamasi khususnya pada kawasan hutan tidak hanya bertujuan untuk memperbaiki kondisi lahan yang tidak

stabil dan mengurangi erosi tanah, namun juga bertujuan dalam jangka panjang untuk memperbaiki ekosistem hutan terkait iklim mikro, keanekaragaman hayati satwa liar, keanekaragaman hayati vegetasi alami, dan kondisi tanah (Hendrychova, 2008; Pietrzykowski, 2008; dan Heras *et al.*, 2008; Donggan *et al.*, 2011).

perlu kalimat sebelum yang menyebut suksesi... Secara umum suksesi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu suksesi primer dan suksesi sekunder. Perbedaan kedua jenis suksesi ini terletak pada kondisi awal habitat suksesi tersebut. Suksesi primer dapat disebabkan oleh gangguan-gangguan seperti gunung berapi, gempa bumi, tanah longsor, banjir atau kebakaran, di mana gangguan tersebut mengakibatkan hilangnya tanah dan organisme, sehingga hanya menyisakan area kosong berupa batuan, lanau, kerikil, atau pasir. Sedangkan suksesi sekunder disebabkan oleh

gangguan seperti angin topan, longsor salju, wabah serangga, penebangan hutan, bulldoser, atau kebakaran yang menyebabkan tanah tetap utuh sertabiji, spora, dan akar tanaman masih ada. Daerah yang diawali proses suksesi sekunder biasanya akan lebih cepat mencapai tahap berikutnya dibandingkan proses suksesi primer. Jumlah dan jenis tanaman yang bertahan hidup seringkali bergantung pada kedalaman dan kondisi tanah. Operasi penambangan di kawasan hutan mengakibatkan gangguan terhadap tanah dan tanaman secara menyeluruh. Reklamasi tambang merupakan salah satu bentuk proses suksesi primer, karena bertujuan untuk mengembalikan hutan ke keadaan semula dalam jangka waktu yang sangat lama.

Selain itu, kegiatan reklamasi wajib dilakukan oleh seluruh pemegang izin usaha pertambangan pada area bekas tambang. Dalam pelaksanaannya perusahaan pertambangan wajib menyimpan sejumlah dana (jaminan reklamasi) yang akan dicairkan atau diberikan kembali kepada perusahaan pertambangan setelah perusahaan tersebut melaporkan dan dievaluasi oleh pemerintah mengenai tingkat keberhasilannya. Oleh karena itu, selain perlu melihat terkait dinamika ekologi atau suksesi yang terjadi pada area reklamasi bekas tambang, maka perlu dievaluasi terkait tingkat keberhasilan reklamasi berdasarkan peraturan perundangan yang berlaku, yaitu Keputusan Menteri ESDM No. 1827.K Tahun 2018

Lampiran VI. Tujuan penelitian ini adalah: i) untuk memahami dinamika ekologi pada area reklamasi bekas tambang, khususnya terkait struktur tegakan, ii) mengidentifikasi jenis-jenis yang tumbuh alami pada area reklamasi, dan iii) menilai tingkat keberhasilan reklamasi sesuai peraturan dan perundangan yang berlaku.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di area pascatambang Ijin Usaha Pertambangan (IUP) PT Solusi Bangun Indonesia (Ex PT Holcim Indonesia, Tbk) di Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat (**Gambar 2.1**) atau Taman Dynamix (Cibadak Educational Forest). PT Solusi Bangun Indonesia telah melakukan pertambangan silika selama 35 tahun di lokasi tersebut dan melakukan reklamasi setelah tutup tambang. Kegiatan penanaman di area bekas tambang dimulai dari tahun 2013-2014 dengan jenis tanaman dominan yang ditanam adalah Pinus (*Pinus merkusii*), Karet (*Hevea brasiliensis*), dan Sengon buto (*Enterolobium cyclocarpum*). waktu???

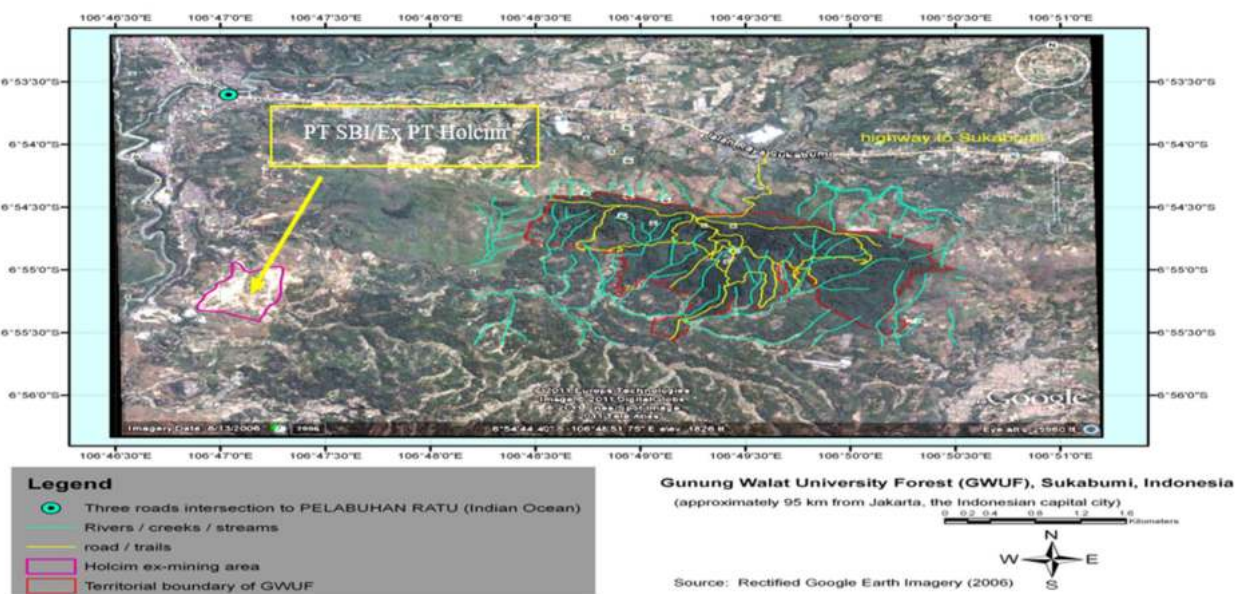
2.2. Desain Penelitian

Analisa vegetasi untuk struktur tegakan dan pengukuran tingkat keberhasilan reklamasi dilakukan dengan menggunakan plot lingkaran yang dimodifikasi dengan radius $r = 17,8$ m atau sekitar 0,1 ha (James dan Shugart,

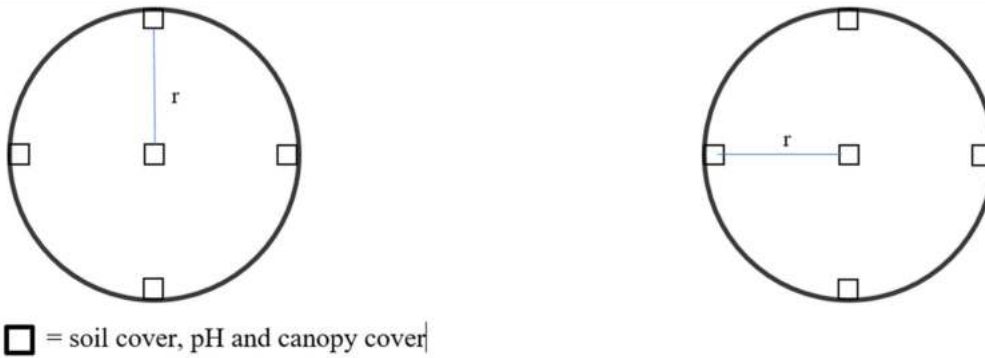
1970). Sebanyak 10 petak (± 1 ha) yang merupakan ukuran jumlah petak minimum yang dapat digunakan untuk penelitian silvikultur (Lamprecht, 1989) (**Gambar 2.2**). Dengan demikian, luas areal reklamasi untuk inventarisasi vegetasi dan pengukuran tingkat keberhasilan reklamasi adalah ± 1 ha. Metode pengambilan sampel dilakukan dengan secara acak untuk mendapatkan data yang representatif dan probabilitas inklusi data yang sama.

Semua pohon yang memiliki diameter setinggi dada (*diameter at breast height*, DBH, 1,3 m) $DBH \geq 10$ cm yang berada pada radius $r = 17,8$ m dicatat nama jenis, serta

diukur diameter dan tinggi totalnya. Pada radius $r = 17,8$ m juga dievaluasi dan diukur tingkat penatagunaan lahan, penebaran tanah pucuk, kegiatan pemeliharaan serta erosi dan sedimentasinya. Untuk pengukuran pH tanah, *covercrop* dan penutupan tajuk dilakukan pada lokasi kotak berbentuk bujur sangkar yang ditempatkan di dalam plot lingkaran, 1 di tengah dan 4 di penjuru mata angin, yaitu utara, selatan, timur dan barat. Data hasil pengukuran selanjutnya diolah untuk mengetahui komposisi dan jenis serta tingkat keberhasilan reklamasi (**Tabel 2.1**). Titik koordinat 10 plot pengukuran disajikan pada **Tabel 2.2**.



Gambar 2.1 Lokasi pascatambang IUP PT Solusi Bangun Indonesia (source: ipbuniversity, 2020)



Gambar 2.2 Plot pengukuran keberhasilan reklamasi

Tabel 2.1 Pengolahan data hasil analisa vegetasi untuk struktur tegakan

| Rumus | Sumber |
|---|-------------------------------|
| Arithmetic mean diameter (\bar{d}): $\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N}$ where: di: diameter of the individual tree N: total number of trees of the stand | Brodbeck, 2004 |
| Total stand basal area (G): $G = \sum_{i=1}^N g_i$; and $g_i = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2$ where: gi : basal area of the i th trees di : dbh of the trees | Lu, 1999 |
| Arithmetic mean height ($h_{\bar{d}}$): $h_{\bar{d}} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N}$ where: hi : height of the individual tree n : total number of trees of the stand | |
| Soil Cover (\overline{SC}) = $\frac{\sum_{i=1}^N \overline{SC}_i}{N}$; and $\overline{SC}_i = \frac{\text{number of screened soil cover}}{256}$ where: SCi: number of screened soil cover in the sub plot N: number of plot n: number of sub plot | |
| Canopy Cover (CC): $CC = 100 - C_i$ $C_i = \left(C_1 + C_2 + C_3 + \dots + \frac{C_n}{N} \right) \times 1.04$ where: Ci: hasil pengukuran tajuk ke i Cn: hasil pengukuran tajuk ke n N: jumlah titik pengukuran | (Suprianto dan Irawan, 2001). |
| Standard deviation/SD (σ_x): $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}}$ and variance (σ_x^2): $\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}$ | |

Tabel 2.2 Titik koordinat sampling

| No. Plot | Titik Koordinat | |
|----------|-----------------|-------------|
| | Lintang Selatan | Bujur Timur |
| 1 | 6°55'16"S | 106°47'6"E |
| 2 | 6°55'15"S | 106°47'5"E |
| 3 | 6°55'14"S | 106°47'10"E |
| 4 | 6°55'14"S | 106°47'11"E |
| 5 | 6°55'21"S | 106°48'26"E |
| 6 | 6°55'38"S | 106°52'27"E |
| 7 | 6°54'24"S | 106°46'46"E |
| 8 | 6°52'19"S | 106°45'56"E |
| 9 | 6°54'34"S | 106°47'3"E |
| 10 | 6°54'46"S | 106°47'8"E |

2.3. Penilaian Keberhasilan Reklamasi

Pengukuran tingkat keberhasilan reklamasi menggunakan bentuk plot yang sama dengan analisa vegetasi. Sedangkan pedoman ESDM untuk penilaian reklamasi didasarkan pada kuantitas dan kualitas reklamasi, yaitu Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik Lampiran VI adalah sebagai berikut:

a. Penatagunaan lahan (60%); meliputi penatagunaan lahan bekas tambang (40%), penyebaran tanah zona pengakaran (total skor 10%), serta pengendalian erosi sedimentasi dan pengelolaan air (10%).

b. Revegetasi (20%) meliputi pertumbuhan tanaman penutup tanah (2,5%), pertumbuhan jenis cepat tumbuh (7,5%), pertumbuhan jenis pohon lokal (5%) dan pengendalian Air Asam Tambang (5%).

c. Penyelesaian akhir (20%) meliputi penutup tajuk (10%) dan pemeliharaan (10%). dianalisis dan disajikan dalam bentuk apa??

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Keakuratan sampling

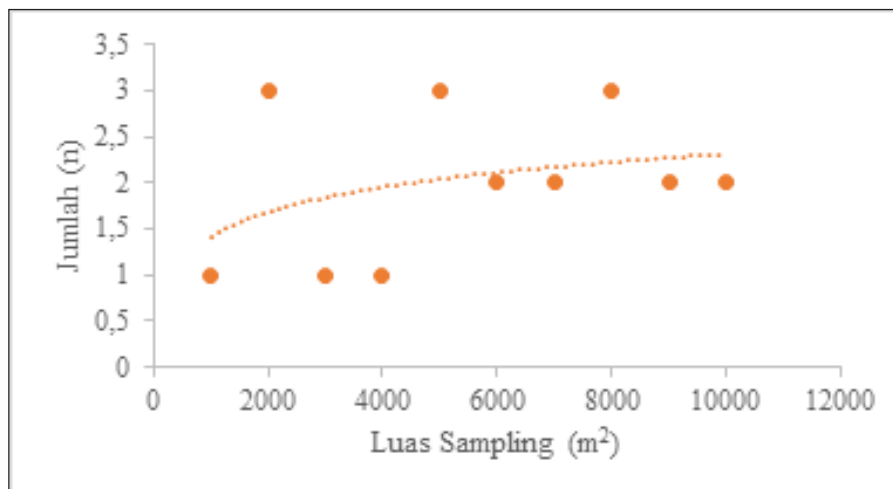
Kurva spesies-area adalah salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menentukan luas perwakilan minimum komunitas tertentu (Ganderton dan Coker,

2005) dan ukuran petak minimum untuk survei komunitas tumbuhan (Lamprecht, 1989). Analisis komunitas vegetasi harus dilanjutkan sampai peningkatan spesies baru yang ditemukan pada plot berikutnya, sekurang-kurangnya di bawah 10% dari jumlah spesies yang ditemukan di semua plot (Cain, 1938; Lamprecht, 1989).

Dalam penelitian ini, pembentukan kurva spesies-area didasarkan pada semua spesies pohon dengan ukuran DBH ≥ 10 cm. Hasil inventarisasi vegetasi menunjukkan bahwa penambahan jumlah jenis pohon yang terdapat pada areal reklamasi dengan jumlah penambahan jenis tanaman $< 10\%$ sudah terjadi pada plot 5 ke plot 6 (ukuran plot 5.000 - 6.000 m²). Hal ini menegaskan bahwa desain petak yang digunakan dalam penelitian ini sesuai untuk inventarisasi vegetasi di area bekas

tambang. Kurva spesies-area dapat dilihat secara detail pada **Gambar 3.1**.

Keakuratan pengambilan sampel selanjutnya dinilai berdasarkan kesalahan standar deviasi dari rata-rata *basal area*. Semakin kecil kesalahan nilai standar deviasi rata-rata *basal area*, maka semakin besar plot yang digunakan sudah mewakili seluruh populasi. Hasil perhitungan standard deviasi dari keseluruhan plot dan setiap plot dapat dilihat pada **Tabel 3.1**. Dalam penelitian ini, standar deviasi yang dihitung dari rata-rata luas bidang dasar (*basal area*) baik untuk semua plot dan setiap plot didasarkan pada pohon dengan DBH ≥ 10 cm. Nilai standar deviasi semua plot, plot 1, plot 3, plot 4, plot 5, plot 6, plot 7, dan plot 8 berada di bawah 10%, yaitu masing-masing 9,23%, 4,94%, 4,66%, 5,13%, 4,79%, 7,73%, 5,53%, dan 6,97%.



Gambar 3.1 Kurva species area

Tabel 3.1 Rata-rata *basal area* dan standar deviasi untuk semua plot dan setiap plot

| Plot | Rata-rata Basal Area \pm SD* | Standar Deviasi (Sg****; %) |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Seluruh Plot (m ² /ha) | 15,87 \pm 0,16 | 9,23 |
| Plot 1 (m ² /0,1 ha) | 11,15 \pm 0,09 | 4,94 |
| Plot 2 (m ² /0,1 ha) | 13,43 \pm 0,25 | 12,78 |
| Plot 3 (m ² /0,1 ha) | 19,17 \pm 0,11 | 4,66 |
| Plot 4 (m ² /0,1 ha) | 19,44 \pm 0,13 | 5,13 |
| Plot 5 (m ² /0,1 ha) | 16,80 \pm 0,10 | 4,79 |
| Plot 6 (m ² /0,1 ha) | 15,21 \pm 0,16 | 7,73 |
| Plot 7 (m ² /0,1 ha) | 20,97 \pm 0,14 | 5,53 |
| Plot 8 (m ² /0,1 ha) | 21,52 \pm 0,18 | 6,97 |
| Plot 9 (m ² /0,1 ha) | 14,01 \pm 0,20 | 10,26 |
| Plot 10 (m ² /0,1 ha) | 7,00 \pm 0,12 | 11,42 |

standar deviasi plot 2, plot 9 dan plot 10 lebih dari 10%, yaitu 12,78%, 10,26%, dan 11,42%, yang kemungkinan disebabkan oleh perbedaan jenis tanaman yang menyebabkan adanya variasi tingkat pertumbuhan diameter. Nilai standar deviasi rata-rata basal area adalah sekitar 10%, hal ini sesuai dengan persyaratan keakuratan untuk analisa vegetasi konvensional (Zöhrer, 1980).

3.2. Diameter (DBH), Kerapatan dan Basal Area

Diameter rata-rata yang dihitung didasarkan pada rumus diameter rata-rata aritmatika dan

kuadrat (area dasar) (Tabel 3.2). Secara umum, rata-rata diameter pohon di areal reklamasi pada semua plot adalah 18,70 cm (aritmatika) dan 18,99 cm (kuadrat). Rata-rata diameter baik secara aritmatika dan kuadrat dari plot 1 sampai plot 9 berkisar masing-masing antara 17,00 cm – 19,00 cm dan 18,00 cm dan 20,00 cm. Nilai-nilai tersebut lebih tinggi bila dibandingkan dengan nilai diameter plot 10. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kegiatan penanaman yang berbeda tahun atau disebabkan oleh kurangnya pasokan unsur hara yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan tanaman (Unanaonwi dan Amonum, 2017).

Tabel 3.2 Rata-rata diameter aritmatika dan kuadrat (DBH \geq 10 cm)

| Plot | n | Rata-rata Aritmatika \pm Standar Deviasi (cm) | Rata-rata Kuadratik (cm) |
|-----------------------------------|----|--|-----------------------------|
| Seluruh Plot (m ² /ha) | 10 | 18,70 \pm 4,99 | 18,99 |
| Plot 1 (m ² /0,1 ha) | 1 | 19,90 \pm 3,11 | 20,14 |
| Plot 2 (m ² /0,1 ha) | 1 | 17,90 \pm 6,05 | 18,88 |
| Plot 3 (m ² /0,1 ha) | 1 | 19,33 \pm 3,77 | 19,69 |
| Plot 4 (m ² /0,1 ha) | 1 | 19,41 \pm 4,04 | 19,82 |
| Plot 5 (m ² /0,1 ha) | 1 | 18,53 \pm 3,70 | 18,88 |
| Plot 6 (m ² /0,1 ha) | 1 | 18,41 \pm 5,22 | 19,12 |
| Plot 7 (m ² /0,1 ha) | 1 | 19,42 \pm 4,65 | 19,96 |
| Plot 8 (m ² /0,1 ha) | 1 | 18,73 \pm 5,51 | 19,51 |
| Plot 9 (m ² /0,1 ha) | 1 | 17,33 \pm 6,09 | 18,35 |
| Plot 10 (m ² /0,1 ha) | 1 | 13,33 \pm 4,06 | 13,92 |

Tabel 3.3 Rata-rata kerapatan pohon dan basal area (DBH \geq 10 cm)

| Plot | n | Kerapatan | Rata-rata Basal Area \pm Standar Deviasi |
|-----------------------------------|----|-----------|---|
| Seluruh Plot (m ² /ha) | 10 | 559 | 15,87 \pm 0,16 |
| Plot 1 (m ² /0,1 ha) | 1 | 35 | 11,15 \pm 0,09 |
| Plot 2 (m ² /0,1 ha) | 1 | 48 | 13,43 \pm 0,25 |
| Plot 3 (m ² /0,1 ha) | 1 | 63 | 19,17 \pm 0,11 |
| Plot 4 (m ² /0,1 ha) | 1 | 63 | 19,44 \pm 0,13 |
| Plot 5 (m ² /0,1 ha) | 1 | 60 | 16,80 \pm 0,10 |
| Plot 6 (m ² /0,1 ha) | 1 | 53 | 15,21 \pm 0,16 |
| Plot 7 (m ² /0,1 ha) | 1 | 67 | 20,97 \pm 0,14 |
| Plot 8 (m ² /0,1 ha) | 1 | 72 | 21,52 \pm 0,18 |
| Plot 9 (m ² /0,1 ha) | 1 | 53 | 14,01 \pm 0,20 |
| Plot 10 (m ² /0,1 ha) | 1 | 46 | 7,00 \pm 0,12 |

Parameter kerapatan dan luas bidang dasar (basal area) dihitung berdasarkan DBH pohon ≥ 10 cm (**Tabel 3.3**). Kerapatan dan basal area untuk semua plot masing-masing adalah 599 pohon/ha dan 15,87 m²/ha. Kerapatan tertinggi untuk setiap plot ada pada plot 8 (72 pohon/0,1 ha), sedangkan yang terendah pada plot 1 (35 pohon/0,1 ha). Plot dengan basal area tertinggi ada pada plot 8 (21,52 m²/0,1 ha), sedangkan yang terendah pada plot 10 (7,00 m²/0,1 ha). Menurut peraturan perundang-undangan, perusahaan pertambangan harus menanam pohon dengan jarak tanam 4 m x 4 m (625 pohon/ha). Namun, kerapatan pada semua plot adalah 599 pohon/ha, masih di bawah 625 pohon/ha. Kondisi ini terjadi kemungkinan akibat kematian bibit yang tidak dilakukan proses penyulaman/penggantian bibit yang mati.

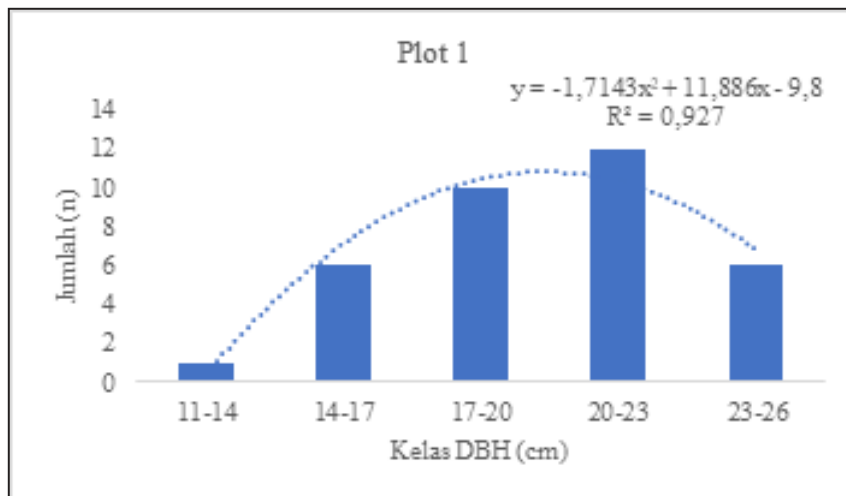
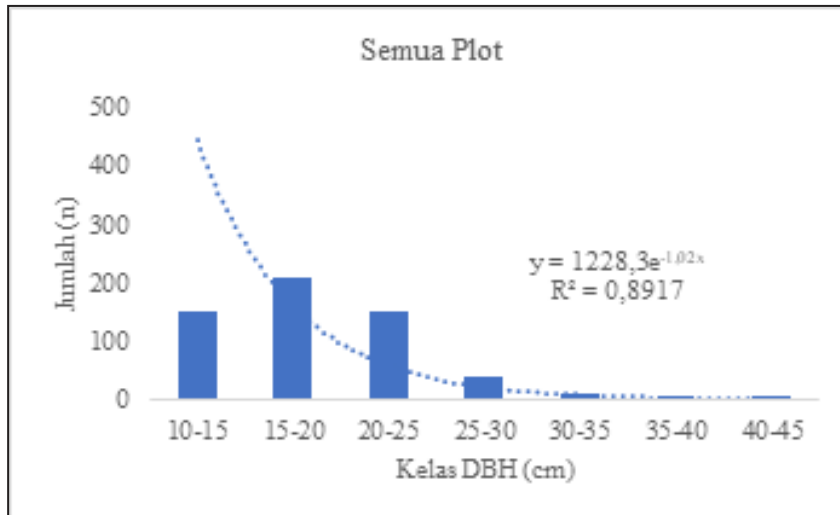
3.3. Distribusi Diameter

Dalam penelitian ini, distribusi diameter dihitung dari jumlah pohon dengan kelas DBH ≥ 10 cm (Interval DBH = 5 cm untuk semua plot, dan interval DBH = 3 cm untuk setiap plot). Persamaan model hubungan antara jumlah pohon dengan kelas DBH dibuat dengan Microsoft excel. Secara umum grafik yang dibentuk dari hubungan jumlah pohon dengan kelas diameter dibagi menjadi tiga bentuk, yaitu *J-shape* terbalik, kurva sebaran normal yang tidak sempurna dan kurva sebaran normal yang

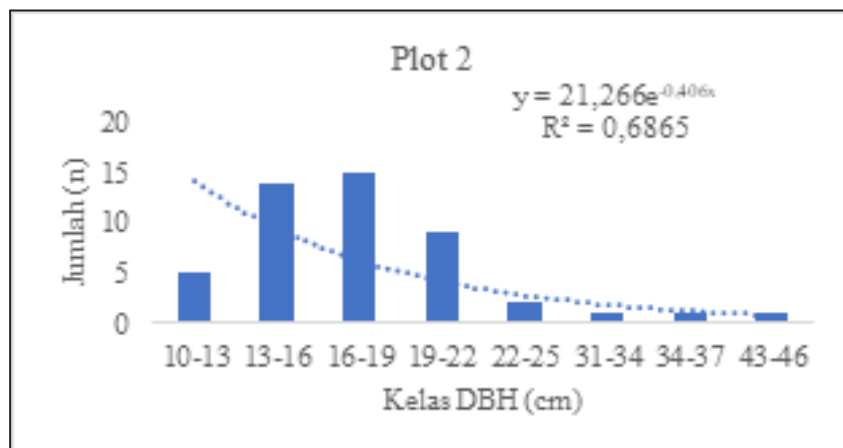
sempurna (**Gambar 3.2** dan **Gambar 3.3**).

Distribusi diameter pohon mampu menggambarkan struktur hutan atau lapisan tajuk penyusun suatu tegakan hutan. Pada hutan alam atau hutan tidak seumur (*unaged forest*), struktur hutan menyerupai huruf J terbalik dan pada hutan tanaman atau hutan seumur (*aged forest*) struktur hutan berbentuk lonceng atau kurva sebaran normal dengan jumlah pohon terbesar berada dalam kisaran diameter pertengahan (Safitri *et al.*, 2020). Pola sebaran diameter ini mampu menunjukkan apakah kondisi hutan berada dalam kisaran normal atau telah mengalami gangguan. Grafik untuk semua plot, plot 2, plot 9 dan plot 10 menunjukkan grafik dengan bentuk J-terbalik, yaitu bahwa jumlah total individu menurun dengan meningkatnya DBH. Diantara ke empat grafik bentuk J-terbalik, grafik pada plot 10 memiliki koefisien korelasi (*r*) paling tinggi, yaitu $r = 0.9758$. Sedangkan nilai *r* paling rendah pada grafik berbentuk J-terbalik adalah pada plot 2, yaitu $r = 0.6865$.

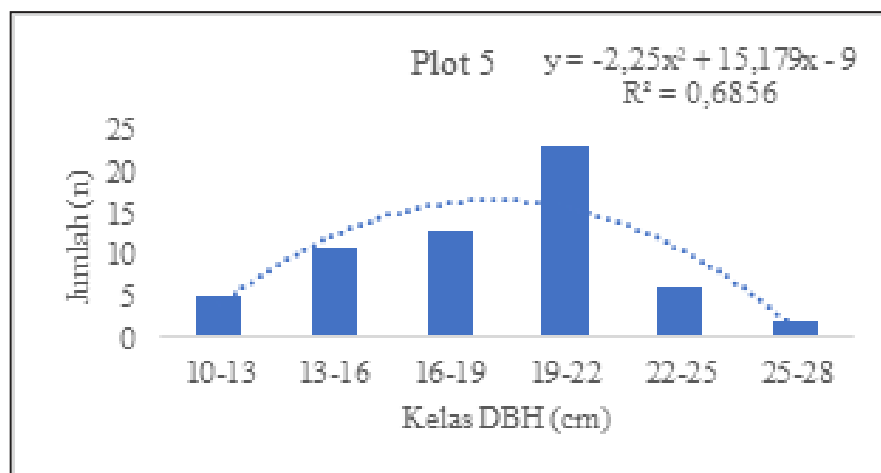
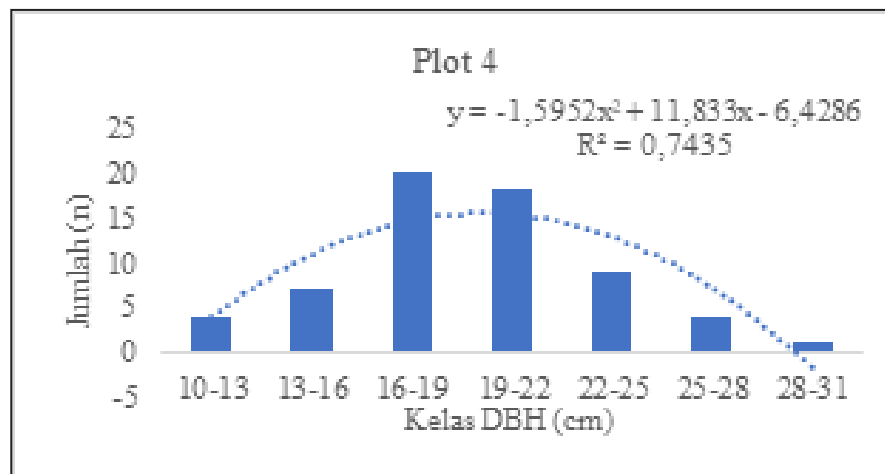
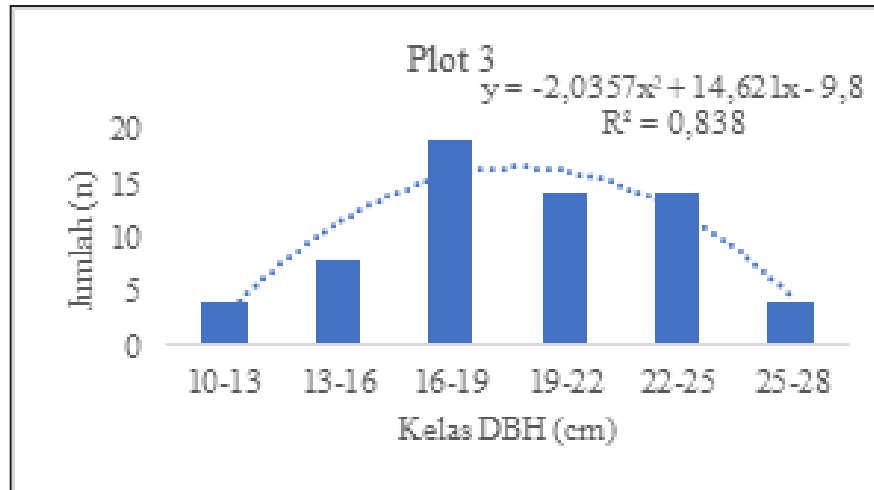
Grafik dengan bentuk kurva sebaran normal yang tidak sempurna dimiliki oleh plot 1, plot 6 dan plot 8. Diantara ke tiga grafik bentuk kurva sebaran normal yang tidak sempurna, grafik pada plot 1 memiliki koefisien korelasi (*r*) paling tinggi, yaitu $r = 0.927$. Sedangkan nilai *r* paling rendah pada grafik bentuk kurva sebaran normal yang tidak sempurna adalah pada plot 8, yaitu $r = 0.662$. Pola sebaran tersebut



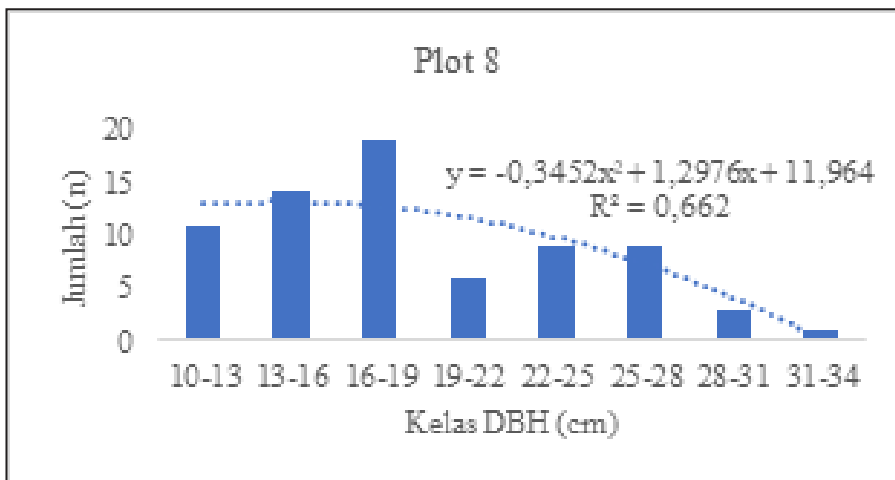
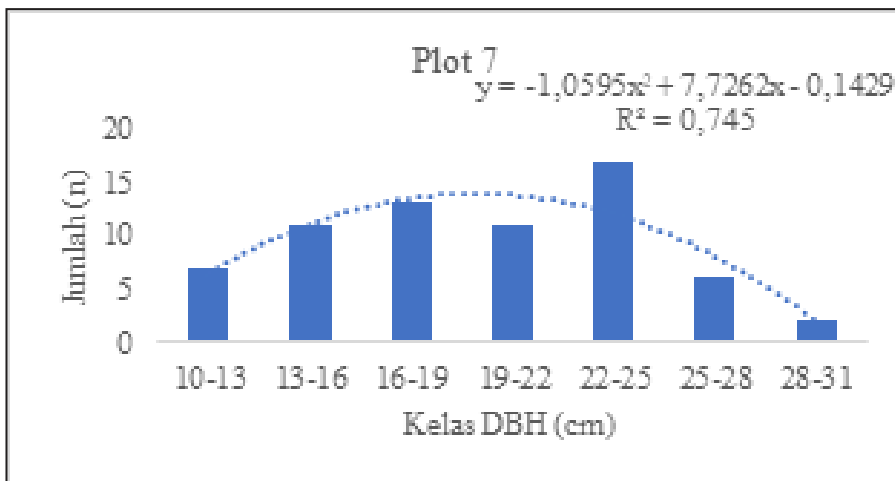
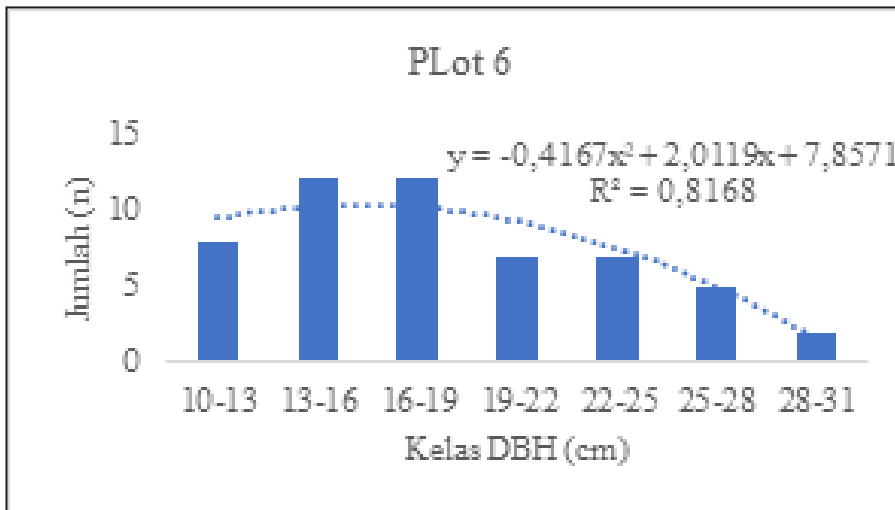
Gambar 3.2 Distribusi diameter untuk semua plot dan plot 11



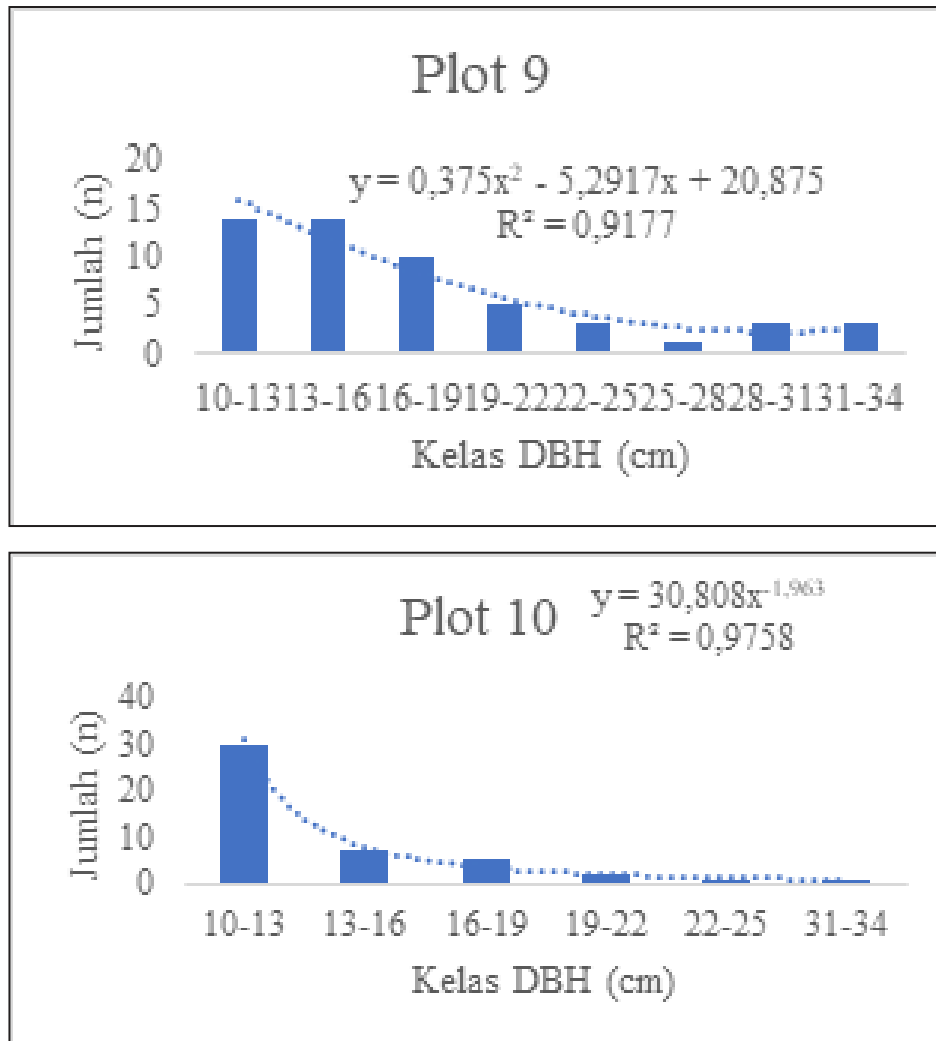
Gambar 3.3a Distribusi diameter untuk plot 2



Gambar 3.3b Distribusi diameter untuk plot 3 – plot 5



Gambar 3.3c Distribusi diameter untuk plot 6 – plot 8



Gambar 3.3d Distribusi diameter untuk plot 9 – plot 10

menunjukkan bahwa tidak ada lagi pohon-pohon yang berdiameter lebih besar 23-26 cm pada plot 1, serta lebih kecil dari 10-13 cm untuk plot 6 dan plot 8. Grafik dengan bentuk kurva sebaran normal yang sempurna dimiliki oleh plot 3, plot 4, plot 5 dan plot 7. Diantara ke empat grafik bentuk kurva sebaran normal yang sempurna, grafik pada plot 3 memiliki koefisien korelasi (r) paling tinggi, yaitu r =

0.838. Sedangkan nilai r paling rendah pada grafik bentuk kurva sebaran normal yang tidak sempurna adalah pada plot 5, yaitu r = 0.6856. Keempat plot mempunyai sebaran diameter berbentuk lonceng atau sebaran normal yang sempurna (grafik normal), di mana jumlah pohon berdiameter kecil dan berdiameter paling besar berada dalam komposisi seimbang.

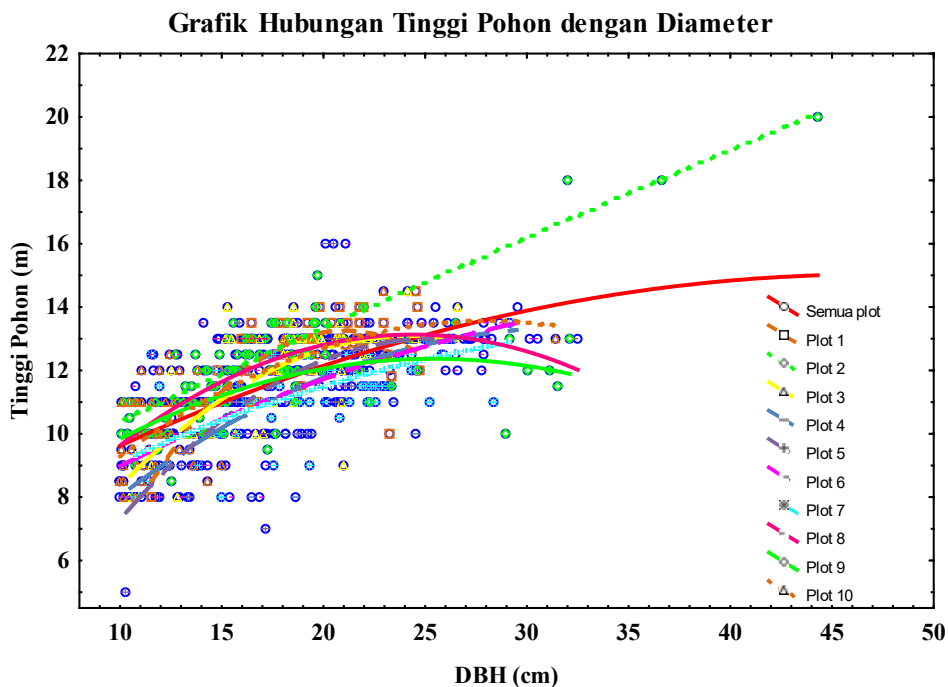
Astriyani dan Pambudhi (2010) menyatakan

bahwa struktur tegakan normal yang mengikuti pola kurva J terbalik, di mana populasi tegakan dengan dimensi yang lebih kecil (diameter kecil) lebih banyak dalam kerapatan (pohon/ha) dibandingkan dengan diameter besar. Menurut hukum de Liocort suatu tegakan hutan alam dikatakan normal jika kurvanya membentuk J terbalik. Distribusi kelas diameter pada suatu tegakan yang membentuk kurva J terbalik merupakan indikator tegakan yang stabil dan berkembang. Tegakan tersebut memiliki lebih banyak pohon dalam kelas-kelas yang lebih kecil, menunjukkan rekrutmen yang terus-menerus secara berkelanjutan untuk suksesi alami (Gonçalves *et al.*, 2017; Staporn *et al.*, 2022).

3.4 Tinggi Tegakan

Rata-rata tinggi total untuk semua plot adalah 11.87 m untuk aritmatika dan 12.25 m untuk Lorey (**Tabel 3.4**). Plot 5 memiliki rata-rata aritmatika paling tinggi dibandingkan plot-plot lainnya yaitu 13.28 m. Sedangkan untuk rata-rata tinggi Lorey, plot 2 memiliki rata-rata tinggi yang paling besar, yaitu 14.18 m. Plot 10 memiliki rata-rata tinggi yang paling rendah baik aritmatika maupun Lorey dibandingkan plot-plot lainnya yaitu 10.51 m untuk aritmatika dan 11.23 m untuk Lorey.

Secara umum terlihat bahwa tinggi total bertambah seiring dengan bertambahnya DBH untuk semua plot dan setiap plot (**Gambar 3.4**). Nilai korelasi untuk semua plot adalah



Tabel 3.4 Rata-rata tinggi tegakan baik semua plot maupun setiap plot (DBH \geq 10 cm)

| Plot | n | Rata-rata Aritmatika \pm Standar Deviasi (m) | Rata-rata Lorey's (hg; m) |
|-----------------------------------|----|--|---------------------------|
| Seluruh Plot (m ² /ha) | 10 | 11,87 \pm 1,67 | 12,25 |
| Plot 1 (m ² /0,1 ha) | 1 | 12,69 \pm 1,34 | 12,86 |
| Plot 2 (m ² /0,1 ha) | 1 | 12,71 \pm 2,00 | 14,18 |
| Plot 3 (m ² /0,1 ha) | 1 | 12,20 \pm 1,47 | 12,52 |
| Plot 4 (m ² /0,1 ha) | 1 | 11,44 \pm 1,49 | 11,86 |
| Plot 5 (m ² /0,1 ha) | 1 | 13,28 \pm 1,97 | 12,03 |
| Plot 6 (m ² /0,1 ha) | 1 | 11,23 \pm 1,76 | 11,88 |
| Plot 7 (m ² /0,1 ha) | 1 | 11,30 \pm 1,36 | 11,70 |
| Plot 8 (m ² /0,1 ha) | 1 | 12,07 \pm 1,33 | 12,50 |
| Plot 9 (m ² /0,1 ha) | 1 | 11,28 \pm 1,08 | 11,71 |
| Plot 10 (m ² /0,1 ha) | 1 | 10,51 \pm 1,63 | 11,23 |

$r = 0.6428$. Sedangkan untuk setiap plot, plot 2 memiliki nilai korelasi paling tinggi yaitu $r = 0.8626$, dan yang terendah adalah plot 1, yaitu $r = 0.5040$. Kurva yang lebih curam menampilkan hubungan antara pertambahan tinggi total dengan DBH.

3.5. Tingkat Keberhasilan Reklamasi

Pada penelitian ini juga dilakukan penilaian terhadap keberhasilan reklamasi area bekas tambang yang dilakukan. Penilaian dilakukan berdasarkan atas Peraturan Perundang-Undangan dari KESDM, yaitu menurut Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 1827.K/30/MEM/2018. Area penelitian merupakan bekas tambang silika

yang dilakukan reklamasi pada tahun 2013-2014. Hasil sampling dari 10 plot lingkaran (1 ha) didapatkan bahwa area reklamasi tersebut mencapai tingkat keberhasilan 96,40% (**Tabel 3.5**). Beberapa parameter yang belum terpenuhi diantaranya adalah jumlah tanaman, cover crop, dan penutupan tajuk. Namun, ketiga parameter tersebut sudah lebih dari 80% dari total nilai yang ada, sehingga sebenarnya dapat dikatakan sudah mencapai tingkat keberhasilan yang sangat bagus. Untuk meningkat keanekaragaman perlu dilakukan proses pengayaan, yaitu menanam jenis tanaman lainnya (Yunanto, 2018; Yunanto and Amanah, 2019).

Seperti diketahui bahwa kegiatan reklamasi

Tabel 3.5 Tingkat keberhasilan reklamasi tambang

| No. | Uraian Kegiatan | Bobot (%) | Hasil Penilaian Lapangan | Nilai Akhir (%) |
|-----|--|-----------|--|-----------------|
| 1. | Penatagunaan lahan: Penataan lahan dan penimbunan kembali lahan bekas tambang | 40 | Plot 1 = 100% Plot 2 = 100% Plot 3 = 100% Plot 4 = 100% Plot 5 = 100% Plot 6 = 100% Plot 7 = 100% Plot 8 = 100% Plot 9 = 100% Plot 10 = 100% Rata-rata = 100% | 40 |
| | Penebaran tanah zona pengakaran | 10 | Plot 1 = 100% Plot 2 = 100% Plot 3 = 100% Plot 4 = 100% Plot 5 = 100% Plot 6 = 100% Plot 7 = 100% Plot 8 = 100% Plot 9 = 100% Plot 10 = 100% Rata-rata = 100% | 10 |
| | Pengendalian erosi dan sedimentasi | 10 | Plot 1 = 100% Plot 2 = 100% Plot 3 = 100% Plot 4 = 100% Plot 5 = 100% Plot 6 = 100% Plot 7 = 100% Plot 8 = 100% Plot 9 = 100% Plot 10 = 100% Rata-rata = 100% | 10 |
| 2. | Revegetasi | | | |
| | Penanaman tanaman penutup (cover crop) | 2.5 | Rata-rata: Plot 1 = 77% Plot 2 = 65% Plot 3 = 76% Plot 4 = 40% Plot 5 = 74% Plot 6 = 68% Plot 7 = 70% Plot 8 = 83% Plot 9 = 100% Plot 10 = 76% Rata-rata semua plot = 73% | 1.82 |

| No. | Uraian Kegiatan | Bobot (%) | Hasil Penilaian Lapangan | Nilai Akhir (%) |
|---------------------------------|---------------------------------------|-----------|---|-----------------|
| | Penanaman tanaman cepat tumbuh | 7.5 | Plot 1 = 35 Plot 2 = 48 Plot 3 = 63 Plot 4 = 63 Plot 5 = 60 Plot 6 = 53 Plot 7 = 67 Plot 8 = 72 Plot 9 = 53 Plot 10 = 46 Total = 560 pohon Persentase = $560/625 \times 100\%$ = 89.6% | 6.72 |
| | Penanaman tanaman jenis local | 5 | Plot 1 = 35 Plot 2 = 48 Plot 3 = 63 Plot 4 = 63 Plot 5 = 60 Plot 6 = 53 Plot 7 = 67 Plot 8 = 72 Plot 9 = 53 Plot 10 = 46 Total = 560 pohon Persentase = $560/625 \times 100\%$ = 89.6% | 4.48 |
| | Pengendalian air asam tambang | 5 | Rata-rata: Plot 1 = 5 Plot 2 = 5 Plot 3 = 5 Plot 4 = 5 Plot 5 = 5 Plot 6 = 5 Plot 7 = 5 Plot 8 = 5 Plot 9 = 5 Plot 10 = 5 Rata-rata semua plot = 5 Kategori baik | 5 |
| 3. | Penyelesaian akhir Penutupan tajuk | 10 | Rata-rata: Plot 1 = 85.96% Plot 2 = 86.48% Plot 3 = 82.22% Plot 4 = 79.72% Plot 5 = 80.86% Plot 6 = 82.74% Plot 7 = 81.18% Plot 8 = 85.65% Plot 9 = 84.71% Plot 10 = 88.72% Rata-rata semua plot = 83.82% Kategori baik | 8.38 |
| | Perawatan | 10 | Telah dilakukan pemupukan, pengendalian, penebasan, dll | 10 |
| Total nilai keberhasilan | | | | 96,40 |

dapat menciptakan kondisi lingkungan yang baik untuk regenerasi alami (Yunanto *et al.*, 2021). Secara umum, kegiatan reklamasi tambang di Indonesia meliputi *recontouring* tanah, penyebaran tanah, pengendalian erosi dan sedimentasi, pengelolaan air permukaan, revegetasi dan pemeliharaan (Amanah dan Yunanto, 2019). Revegetasi merupakan program utama reklamasi tambang, khususnya di kawasan kehutanan. Kegiatan revegetasi area bekas tambang diawali dengan penanaman *covercrop*. Penanaman tanaman legum penutup di kawasan reklamasi sangat dianjurkan untuk langkah awal stabilisasi lahan bekas tambang, mengingat kemampuannya untuk meningkatkan jumlah nitrogen dalam tanah (Buta *et al.*, 2019). Setelah penanaman tanaman *covercrop* maka dilanjutkan dengan penanaman tanaman pionir cepat tumbuh yang umumnya berasal dari Famili Fabaceae. Jenis dari Family Fabacea diantaranya adalah *Enterolobium siklokarpum* (Jacq.) Griseb., *Samanea saman* (Jacq.) Merr., *Senna siamea* (Lam.) H.S. Irwin & Barneby, dan *Paraserianthes falcataria* (L.) I.C. Nielsen. Jenis-jenis tersebut dapat berasosiasi dengan Bakteri *Azotobacter* dan *Rhizobium* untuk fiksasi nitrogen (Desbrosses dan Stougaard 2011; Suharno dan Sancayaningsih 2013; Mahmud *et al.*, 2020). Penanaman jenis pionir dapat meningkatkan kesuburan tanah dengan menghasilkan akar eksudat yang menarik bakteri tertentu, menciptakan iklim mikro,

dan mencegah erosi karena kemampuan sistem perakaran untuk menahan tanah dari gerusan air (Lee *et al.*, 2020). Selanjutnya adalah penanaman tanaman sisipan berdaur panjang, yang diutamakan jenis lokal. Semakin beragam jenis tanaman sisipan yang ditanam akan mengakibatkan semakin beragamnya natural regeneration (Yunanto, 2018). Selain itu semakin bertambahnya umur reklamasi tambang juga akan semakin meningkatkan indeks keanekaragaman hayati (Haigh *et al.*, 2020; Lewis dan Rosales 2020).

Lahan bekas tambang pada umumnya tidak subur. Kekurangan bahan organik dapat menyebabkan tanah tidak subur, pH rendah, kandungan liat tinggi, atau unsur hara yang sangat rendah (Hartati dan Sudarmadji 2016; Feng *et al.*, 2019; Nadalia dan Pulunggono, 2020). Kondisi tanah sangat mempengaruhi pertumbuhan dan keragaman tanaman (jumlah tanaman hidup dan tumbuh). Nutrisi tersebut menjadi tersedia untuk tanaman namun dikendalikan oleh interaksi antara sifat fisik, kimia, dan sifat biologis. Ketersediaan unsur hara pada tanah sangat penting untuk pertumbuhan dan keragaman tanaman. Kesuburan tanah adalah tidak terlepas dari keseimbangan sifat fisik, kimia, dan biologis. Namun, untuk meningkatkan keanekaragaman perlu dilakukan proses pengayaan, yaitu menanam jenis tanaman lainnya (Yunanto, 2018; Yunanto and Amanah, 2019).

4. KESIMPULAN

Secara umum, rata-rata diameter pohon di areal reklamasi pada semua plot adalah 18,70 cm (aritmatika) dan 18,99 cm (kuadrat). Grafik yang dibentuk dari hubungan jumlah pohon dengan kelas diameter dibagi menjadi tiga bentuk, yaitu J-shape terbalik, kurva sebaran normal yang tidak sempurna dan kurva sebaran normal yang sempurna. Rata-rata tinggi total untuk semua plot adalah 11.87 m untuk aritmatika dan 12.25 m untuk Lorey.

Hasil sampling dari 10 plot lingkaran (1 ha) didapatkan bahwa area reklamasi tersebut mencapai tingkat keberhasilan 96,40%. Beberapa parameter yang belum terpenuhi diantaranya adalah jumlah tanaman, cover crop dan penutupan tajuk. Untuk meningkatkan keanekaragaman perlu dilakukan proses pengayaan, yaitu menanam jenis tanaman lainnya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Amanah F, Yunanto T. 2019. Mine reclamation period to successfully meet criteria in Indonesia. In: AB Fourie, M Tibbett (eds). *Mine Closure 2019; Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. DOI: 10.36487/ACG_rep/1915_103_Amanah
- Astriyani, Pambudhi F. 2010. Analisis Bentuk Struktur dan Hubungannya Dengan Riap Tegakan Tunggal Hutan Alami Produksi. *Jurnal Kehutanan Tropika Humida*. 3 (1): 28-41.
- Brodbeck, F. (2004). *Structure and Processes in Traditional Forest Gardens of Central Sulawesi, Indonesia*. Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen.
- Buta M, Blaga G, Paulette L, Păcurar I, Rosca S, Borsai O, Grecu F, Sînziana PE, Negrusier C. 2019. Soil reclamation of abandoned mine lands by revegetation in Northwestern Part of Transylvania: A 40-year retrospective study. *Sustainability* 11: 1-18. DOI: 10.3390/su11123393.
- Cain, S. A. (1938). The species-area curve. *The American Midland Naturalist*, 573-581.
- Desbrosses GJ, Stougaard J. 2011. Root nodulation: A paradigm for how plant-microbe symbiosis influences host developmental pathways. *Cell Host Microbe* 10 (4): 348-58. DOI: 10.1016/j.chom.2011.09.005.
- Donggan, G., Zhongke, B., Tieliang, S., Hongbo, S., & Wen, Q. (2011). Impacts of Coal Mining on the aboveground vegetation and soil quality: a case study of Qinxin Coal Mine in Shanxi Province, China. *Clean – Soil, Air, Water*, 219-225.
- Doupé, R. G., & Lymbery, A. J. (2005). Environmental risks associated with beneficial end uses of mine lakes in Southwestern Australia. *Mine Water and the Environment*, 134-138.
- Feng Y, Wang J, Bai Z, Reading L. 2019. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Sci Rev* 191: 12-25. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.02.015.

- Ganderton, P., & Coker, P. (2005). *Environmental Biogeography*. Essex: Perason Education.
- Gonçalves, F. M. P., Revermann, R., Gomes, A. L., Aidar, M. P. M., Finckh, M. and Juergens, N. 2017. Tree Species Diversity and Composition of Miombo Woodlands in South-Central Angola: A Chronosequence of Forest Recovery after Shifting Cultivation. *International Journal of Forestry Research*, Volume 2017, 13 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/6202093>
- Haigh M, Woodruffe P, D'Aucourt M, Aun E, Wilding G, Fitzpatrick S, Filcheva E, Noustorova M. 2020. Successful ecological regeneration of opencast coal mine spoils through forestation: From cradle to grove. *Minerals* 10: 1-27. DOI: 10.3390/min10050461
- Hartati, Sudarmadji T. 2016. Relationship between soil texture and soil organic matter content on mined-out lands in Berau, East Kalimantan, Indonesia. *Nusantara Biosci* 8: 83-88. DOI: 10.13057/nusbiosci/n080115.
- Hendrychová, M. (2008). Reclamation success in post-mining landscapes in the Czech Republic: A review of pedological and biological studies. *Journal of Landscape Studies* 1, 63–78.
- Heras, M. M., Nicolau, J. M., & Espigares, T. (2008). Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment. *Ecological Engineering* 34, 168-178.
- James, F. C., & Shugart, H. H. (1970). *A quantitative method of habitat description*. National Audbon Society.
- Lamprecht, H. (1989). *Silviculture in the tropics*. Eschborn, Rossdorf: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.
- Lee JT, Chu MY, Lin YS, Kung KN, Lin WC, LMJ. 2020. Root traits and biomechanical properties of three tropical pioneer tree species for forest restoration in landslide areas. *Forests* 11: 1-17. DOI: 10.3390/f11020179
- Lewis S, Rosales J. 2020. Restoration of forested lands under bauxite mining with emphasis on Guyana during the first two decades of the XXI century: A review. *J Geosci Environ Prot* 8: 41-67. DOI: 10.4236/gep.2020.811003.
- Lloyd, M. V., Doherty, M. D., Jeffree, R. A., John, J., Majer, J. D., Osborne, J. M., & Nichols, O. G. (2002). *Managing the impacts of Tte Australian minerals industry on biodiversity*. London: Australian Centre for Mining Environmental.
- Lu, Y. (1999). *Development of models for sustainable management of the mixed tropical rain*. Dissertation University of Göttingen. Göttingen: Verlag Enrich Goltze GmbH & Co. KG.
- Mahmud K, Makaju S, Ibrahim R, Missaoui A. 2020. Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants* 9: 1-17. DOI: 10.3390/plants9010097.
- Nadalia D, Pulunggono HB. 2020. Soil characteristics of post-mining reclamation land and natural soil without top soil. *J Degrad Min Land Manag* 2 (7): 2011-2016. DOI: 10.15243/

- jdmlm.2020.072.2011.
- Pietrzykowski, M. (2008). Reclamation and reconstruction of terrestrial ecosystems on mine sites - ecological effectiveness assessment. *Energy Vol. 2: Coal Energy*, 120-151.
- Pratiwi, Narendra BH, Siregar CA, Turjaman M, Hidayat A, Rachmat HH, Mulyanto B, Suwardi, Iskandar, Maharani R, Rayadin Y, Prematuri R, Turjaman M, Sato T, Tawaraya K. 2020. The impact of nickel mining on soil properties and growth of two fast-growing tropical trees species. *Intl J For Res* 2020: 1-9. DOI: 10.1155/2020/8837590.
- Safitri, B., Wahyudi dan Christopheros. 2020. Distribusi diameter tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria*) sebagai indikator pertumbuhan normal. *Jurnal Hutan Tropika (Tropical Forest Journal)* Vol. XV (1): 43-50.
- Slingenberg, A., Braat, L., Windt, H., Rademaekers, K., Eichler, L., & Turner, K. (2009). *Study on understanding the causes of biodiversity loss and the policy assessment framework*. Rotterdam: ECORYS Nederland BV.
- Staporn, D., Marod, D., Wongprom, J., and Diloksumpun, S. 2022. Drivers of Native Species Regeneration in the Process of Restoring a Dry Evergreen Forest from Exotic Tree Plantations in Northeastern Thailand. *Forests* 2022, 13, 1321. <https://doi.org/10.3390/f13081321>
- Subowo, G. (2011). Penambangan sistem terbuka ramah lingkungan dan upaya reklamasi pascatambang untuk memperbaiki kualitas sumberdaya lahan dan hayati tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan Vol. 5 No. 2*, 83-94.
- Suharno, Sancayaningsih RP. 2013. Arbuscular Mycorrhizae Fungi: The potential use of heavy metal mycorrhizo-remediation technology in mined field rehabilitation. *Bioteknologi* 10: 31-42.
- Supriyanto and Irawan, U.S. 2001. Technique for Measuring Canopy Cover and Canopy Opening Using a Spherical Densitometer. *Laboratorium Silvikultur SEAMEOBIOTROP*. Bogor, Indonesia
- Unanaonwi, O. E. and Amonum, J. I. 2017. Effect of Mining Activities on Vegetation Composition and nutrient status of Forest Soil in Benue Cement Company, Benue State, Nigeria. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)* Vol 2 (1): 297-305. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.1.3>
- Yunanto T. 2018. Site and Vegetation Development after Coal Mine Reclamation in Kalimantan, Indonesia. [Dissertation]. University of Göttingen, Göttingen.
- Yunanto T, Amanah F, Wisnu NP. 2021. The possibility of reclamation criteria success in Indonesia: Soil condition, vegetation structure and species composition. *J Degrad Min Land Manag* 9: 3201-3210. DOI: 10.15243/jdmlm.2021.091.3201.
- Zöhrer, F. (1980). *Forstinventur. Schriftenreihe „Pareys Studentexte“* 26. Hamburg: Parey.



Analisis Nilai Keekonomian Teknik Peningkatan Oksigen Terlarut Terhadap Ekstraksi Emas dan Perak serta Konsumsi Sodium Sianida

Analysis the Economic Value of Dissolved Oxygen Enhancement Technique for Gold and Silver Extraction and Sodium Cyanide Consumption

Dikri Fajar Ramadhan^{1*}, Imelda Eva Roturena Hutabarat², Denny Lumban Raja³, Sulaeman⁴

^{1,2,3}Prodi Teknologi Metalurgi, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

⁴PT Indo Muro Kencana

* Korespondensi E-mail: dikrifajar@gmail.com

INFO ARTIKEL

Kata Kunci:

Nilai keekonomian, oksigen terlarut, ekstraksi emas, ekstraksi perak, konsumsi NaCN.

ABSTRAK

Proses sianidasi seringkali terbatas oleh konsentrasi oksigen terlarut (DO) dalam air, yang dapat ditingkatkan dengan menggunakan sistem bertekanan. PT Indo Muro Kencana (IMK) telah menerapkan 3 (tiga) strategi peningkatan DO, yaitu teknik injeksi oksigen seperti sparger lance (SPL), peroxide injection (PRI), dan reaktor high shear (RHS), sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses sianidasi mengingat adanya perubahan karakteristik bijih yang diolah sejak tahun 2021. Sejak April 2022, teknik reaktor high shear menjadi metode terbaru yang diimplementasikan oleh PT IMK, menggantikan sparger lance dan injeksi peroksida sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai ekonomis dari ketiga teknik injeksi oksigen dalam proses sianidasi emas dan perak. Uji pelindian dilakukan untuk mengevaluasi seberapa banyak natrium sianida (NaCN) yang digunakan dan seberapa efektif ekstraksi emas dan perak yang terjadi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode reaktor high shear (RHS) menghasilkan tingkat ekstraksi emas dan perak tertinggi, mencapai 97,04% dan 83,83% secara berturut-turut.

Lebih dari itu, teknik RHS juga mengkonsumsi jumlah NaCN yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode lainnya, yakni sekitar 0,84 kg/ton pada waktu tinggal selama 48 jam. Selain itu, pendapatan yang dihasilkan dari ketiga teknik injeksi oksigen tersebut adalah \$275.818,42; \$274.530,16, dan \$285.679,13. Berdasarkan estimasi ini, dapat disimpulkan bahwa metode reaktor high shear (RHS) menjadi pilihan yang paling praktis untuk diimplementasikan dalam proses sianidasi di PT Indo Muro Kencana. Dengan mempertimbangkan efisiensi ekstraksi dan penggunaan reagen yang lebih rendah, implementasi teknik reaktor high shear (RHS) dapat memberikan manfaat signifikan bagi perusahaan, baik dalam hal efisiensi operasional maupun potensi penghematan biaya. Keputusan untuk beralih menggunakan teknik RHS sebagai metode terbaru dalam proses sianidasi menegaskan komitmen PT IMK dalam terus meningkatkan kualitas dan efisiensi dalam aktivitas pengolahan mineral.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Economic value, dissolved oxygen, gold extraction, silver extraction, NaCN consumption

Cyanidation process is often limited by the concentration of dissolved oxygen (DO) in water, which can be enhanced using a pressurized system. PT Indo Muro Kencana (IMK) has implemented 3 (three) DO enhancement strategies, namely oxygen injection techniques such as sparger lance (SPL), peroxide injection (PRI), and high shear reactor (RHS), in an effort to optimize the cyanidation process due to changes in ore characteristics since 2021. Since April 2022, the high shear reactor technique has become the latest method implemented by PT IMK, replacing the previously used sparger lance and peroxide injection. This study aims to analyze the economic value of the three oxygen injection techniques in the gold and silver cyanidation process. Leaching tests were conducted to evaluate the amount of sodium cyanide (NaCN) used and the effectiveness of gold and silver extraction. The test results showed that the high shear reactor

(RHS) method achieved the highest extraction rates for gold and silver, reaching 97.04% and 83.83%, respectively. Moreover, the RHS technique also consumed less NaCN compared to other methods, approximately 0.84 kg/ton during a 48-hour residence time. Additionally, the revenues generated from the three oxygen injection techniques were \$275,818.42, \$274,530.16, and \$285,679.13, respectively. Based on these estimations, it can be concluded that the high shear reactor (RHS) method is the most practical choice to be implemented in the cyanidation process at PT Indo Muro Kencana. Considering the higher extraction efficiency and lower reagent usage, the implementation of the high shear reactor (RHS) technique can provide significant benefits to the company in terms of operational efficiency and cost savings. The decision to switch to the RHS technique as the latest method in the cyanidation process reaffirms PT IMK's commitment to continuously improving the quality and efficiency of mineral processing activities.

1. PENDAHULUAN

Logam emas yang telah banyak digunakan sepanjang sejarah dan tetap menjadi faktor pendorong dalam perkembangan ekonomi hingga zaman sekarang (Huang & Kilic, 2019). Penambangan emas merupakan bisnis internasional yang dilakukan di hampir seluruh daratan kecuali Antartika, yang mengakibatkan penurunan persediaan emas (Ince, 2019). Saat ini, sumber daya tambang emas alami semakin menipis dan bijih berkualitas tinggi secara perlahan habis, dengan bijih emas refraktori menyumbang sekitar sepertiga dari total produksi emas dari bijih alam (Konadu et al., 2019)

Seiring berjalannya waktu, ketersediaan bijih emas dan perak yang hanya membutuhkan satu tahap pelindian semakin berkurang (Aylmore, 2016; Bas et al., 2016). Dalam banyak kasus, kendala tersebut disebabkan oleh adanya fase mineral refraktori yang mengandung logam mulia. Di tempat lain, matriks bijih itu sendiri terdiri dari campuran fase mineral yang heterogen, beberapa di antaranya bersaing dengan emas dan perak dalam proses pelindian. Dalam kasus mineral kompleks atau refraktori, ekstraksi emas dan perak melalui pelindian satu tahap umumnya minim, sehingga memerlukan perlakuan pendahuluan untuk mengubah karakteristik bijih. Metode-

metode *pre-treatment* mineral refraktori yang sangat beragam termasuk dengan asam sulfat atau nitrat, bromida, bioleaching, pelindian bertekanan, dan penggilingan ultrafine (Celep et al., 2018; Snyders et al., 2018).

Saat ini, PT IMK berupaya untuk mengatasi masalah yang terjadi akibat bijih kompleks dengan ditandai tingginya kandungan sulfida, dan juga mempunyai viskositas slurry akibat adanya mineral jenis lempung (*clay*). Sehingga upaya yang dilakukan PT IMK adalah meningkatkan kandungan oksigen terlarut pada proses sianidasi mulai dari teknik *sparger lance*, *peroxide injection* hingga teknologi terbaru yang digunakan PT IMK untuk meningkatkan oksigen terlarut adalah reaktor *high shear* yang diterapkan sejak bulan april 2022.

Bijih kompleks, yang ditandai oleh konsistensinya yang tinggi karena mengandung mineral lempung, memiliki sifat permukaan yang unik yang berkontribusi terhadap daya tarik partikel tertentu di sekitar partikel lempung. Partikel positif ini menciptakan lapisan ionik, yang menghasilkan slurry yang lebih tebal (Bergaya & Lagaly, 2013). Selain itu, kandungan sulfida yang tinggi dapat membentuk lapisan pada permukaan emas. Viskositas yang tinggi, yang merupakan karakteristik slurry yang lebih padat, memberikan resistensi yang signifikan terhadap pengadukan akibat gumpalan partikel yang lebih besar. Akibatnya, partikel padat membentuk penghalang yang

membatasi pelarutan oksigen dalam air. Selain itu, penurunan kadar Oksigen Terlarut (DO) juga dipengaruhi oleh kandungan sulfida yang tinggi, yang mengakibatkan oksidasi zat-zat terlarut (Pratomo, 2014; Soto, 2020).

Mengingat faktor-faktor ini, langkah-langkah proaktif sangat penting. Meningkatkan kandungan DO dalam bijih kompleks menjadi krusial untuk mengurangi konsumsi natrium sianida sekaligus meningkatkan persentase ekstraksi emas dan perak. Dengan mengatasi tantangan ini dan meningkatkan kadar DO, dampak buruk dari viskositas tinggi dan kandungan sulfida dapat diatasi. Pendekatan strategis ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan proses ekstraksi. Karakteristik bijih kompleks, yang ditandai oleh konsistensinya dan sifat permukaannya, memperkenalkan tantangan yang berasal dari viskositas tinggi dan kandungan sulfida. Mengatasi tantangan ini melalui peningkatan kandungan DO menjadi strategi yang bijaksana untuk mengurangi konsumsi sianida dan pada saat yang sama meningkatkan tingkat ekstraksi emas dan perak. Dengan memahami faktor-faktor ini secara komprehensif, operasi pengolahan mineral dapat mengoptimalkan proses mereka, memastikan pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan dan efisien.

Menurut Konadu et al., (2020), keberadaan mineral sulfida di dalam bijih mengurangi laju reaksi sianidasi (sesuai dengan data lapangan)

dengan membentuk lapisan pasif pada permukaan emas (Gui et al., 2023; Konadu et al., 2020). Mineral sulfida seperti pirit, dapat dioksidasi untuk menghasilkan besi-hidroksida (FeOOH), yang kemudian membentuk lapisan pasif pada permukaan emas dan perak, sehingga mencegah emas bersentuhan dengan sianida. Kompleks besi (II) sianida juga dapat dihasilkan ketika pirit bereaksi dengan sianida dan oksigen. Hal ini akan mendorong penggunaan oksigen dan sianida yang tinggi (Guo et al., 2019). Selain itu, terdapat mineral pembentuk perak yang dikenal sebagai argentit dan achantit (Ag_2S) yang pada dasarnya dapat menghambat pelindian emas dan perak jika dalam jumlah besar. Namun, oksigen dapat membantu mengatasi mineral sulfida, karena oksigen dapat mempercepat pelarutan emas dan perak (Anderson, 2016; Wang et al., 2015).

Secara umum, penilaian nilai ekonomi dilaksanakan untuk mengestimasi potensi keuntungan yang dapat diperoleh dari penerapan ketiga teknik, mirip dengan pendekatan yang diambil oleh Lotz dkk. (2015) dalam menganalisis keuntungan sebelum dan setelah penerapan RHS. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai dampak ekonomi dari penggunaan teknik tersebut terhadap hasil yang diperoleh. Ini memfasilitasi perusahaan dalam menentukan teknik yang paling efektif, efisien, dan menguntungkan untuk mengatasi tantangan

dalam penurunan oksigen terlarut dan rekoveri. Dengan memahami implikasi finansial dari setiap teknik, perusahaan dapat mengambil keputusan yang lebih terinformasi dan tepat dalam memilih pendekatan terbaik guna memastikan operasi yang optimal serta hasil yang paling menguntungkan.

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dari ketiga teknik jika dilihat dari hasil ekstraksi dan konsumsi natrium sianida. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah untuk menganalisa nilai keekonomian dari masing-masing teknik yang menghasilkan ekstraksi paling tinggi serta konsumsi sianida yang lebih rendah/efisien.

Melalui penelitian ini, diharapkan mendapat informasi yang berharga mengenai efisiensi dan efektivitas dari teknik SPL, PRI, dan RHS dalam proses pelindian bijih logam. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan kontributif dalam pengembangan dan perbaikan proses pelindian yang lebih efisien dan ramah lingkungan di industri metalurgi. Selain itu, data yang diperoleh dari penelitian ini juga dapat menjadi referensi dan acuan untuk penelitian selanjutnya dalam upaya terus meningkatkan kualitas dan keberlanjutan dari proses pengolahan bijih logam.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium metalurgi PT IMK yang terletak di kompleks

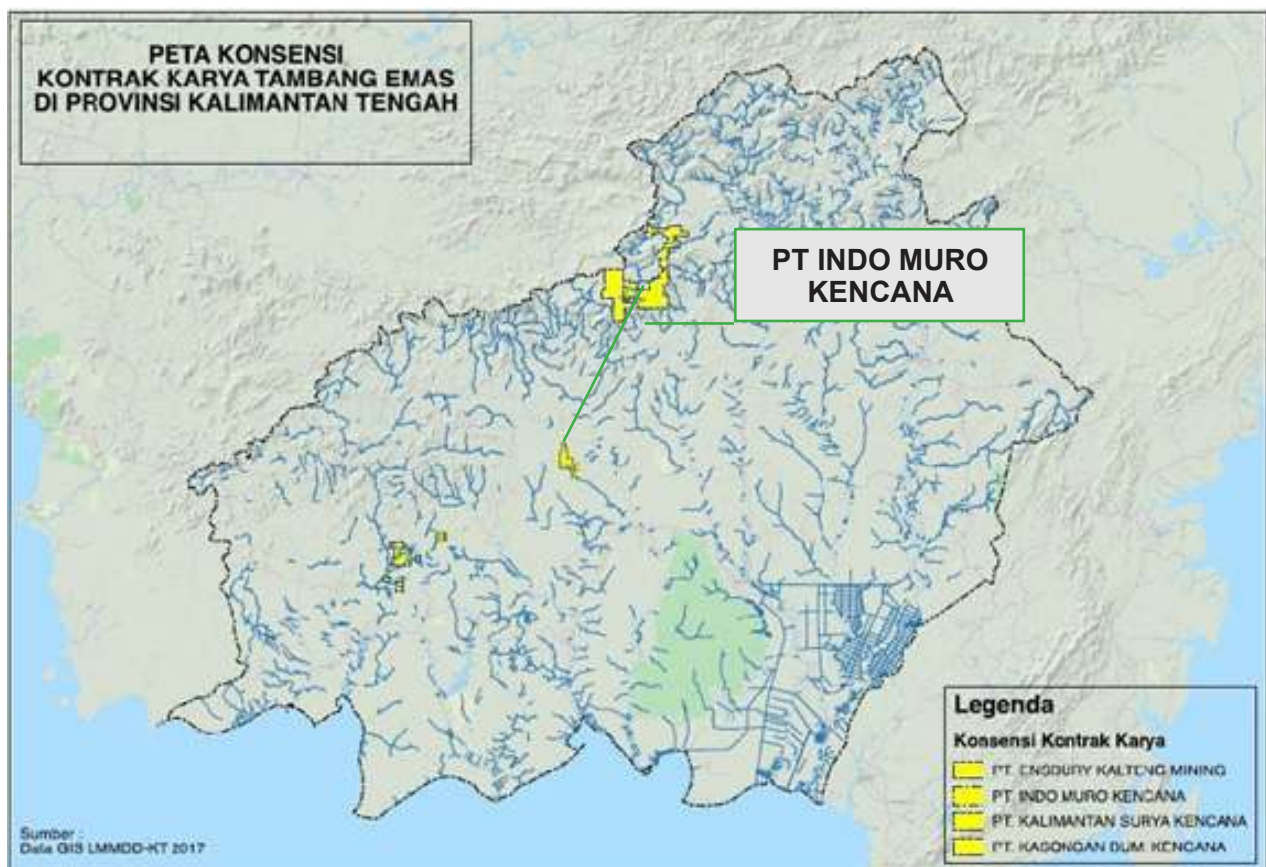
pabrik pengolahan di Kecamatan Permata Intan, Kabupaten Murung Raya, Kalimantan Tengah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.

Di studi ini, berbagai eksperimen dan analisis dilakukan guna menguji efektivitas serta efisiensi dari teknik injeksi oksigen yang berbeda dalam proses sianidasi emas dan perak. Lokasi strategis laboratorium ini memungkinkan peneliti untuk bekerja dengan bijih asli dan kondisi yang mewakili lingkungan pengolahan yang sebenarnya.

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa alat dan bahan yang digunakan diantaranya

seperti pipet volumetri 10mL, buret 10 mL, pH meter, DO meter, *air stone*, *buchner funnel*, *sprit* (suntikan), *reactor* 6000 mL, *marsh funnel*, *bucket*, neraca analitis, kaca arloji, *pulp density scale*, *stopwatch*, kawat saring, vakum filter, dan kertas saring. Adapun bahan yang digunakan meliputi aquades, H_2O_2 , serta *slurry input* dan *output* dari tangki pelindian.

Penelitian dimulai dengan pengambilan sampel slurry dari tangki pelindian, yang kemudian ditimbang untuk mendapatkan persen solid dan diukur viskositasnya. Selanjutnya, pelindian dilakukan pada reaktor dengan



Gambar 1. Lokasi Penelitian (GIS LMMDD-KT, 2017)

pengambilan sampel pada waktu tertentu, yaitu pada jam ke-0, 2, 4, 8, 24, 32, dan 48. Namun, untuk sampel RHS *slurry*, diambil dari keluaran tangki pelindian dengan asumsi proses pelindian terjadi di lapangan. Selanjutnya, dilakukan penambahan H₂O₂ sebanyak 4 mL pada sampel PRI pada jam ke-0, 2, dan 4, dan dilanjutkan dengan uji CIL pada jam ke-16 dengan penambahan karbon aktif sebanyak 10 gpl. Setiap sampel yang diambil pada waktu tertentu, selanjutnya diukur pH dan DO-nya, dan diambil sebanyak 200 mL.

Setelah itu, dilakukan filtrasi terhadap padatan dan cairan untuk mengukur kadar Au dan Ag pada sampel tersebut. Penelitian ini dilakukan sebanyak 14 kali dengan variasi *range* persen solid dari 38% hingga 42% pada volume 5000 mL, dengan tujuan untuk menghasilkan data yang representatif mengenai ekstraksi dan konsumsi natrium sianida dari masing-masing teknik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari setiap teknik terdiri dari dua aspek utama, yaitu ekstraksi emas dan perak, serta proses konsumsi sodium sianida yang dikelola melalui perangkat lunak *Microsoft Excel*. Melalui pengolahan yang teliti, dihasilkan informasi berharga yang mencerminkan nilai ekonomis dari seluruh proses ini.

3.1. Analisa Hasil Ekstraksi Emas dan Perak

Data hasil dari pengujian *Leach Test* berupa jumlah logam di *solution* dan jumlah logam di *tailing (solid)*. Sehingga berdasarkan data tersebut, dapat dilakukan perhitungan persen ekstraksi emas dan perak dari pengujian yang telah dilakukan (Yanuar & Suprpto, 2015). Adapun rumus perhitungan persen ekstraksi ialah sebagai berikut:

$$\% \text{ Ekstraksi} = \frac{M \text{ di Sln}}{M \text{ di Tail} + M \text{ di Sln}} \times 100\% \quad (1)$$

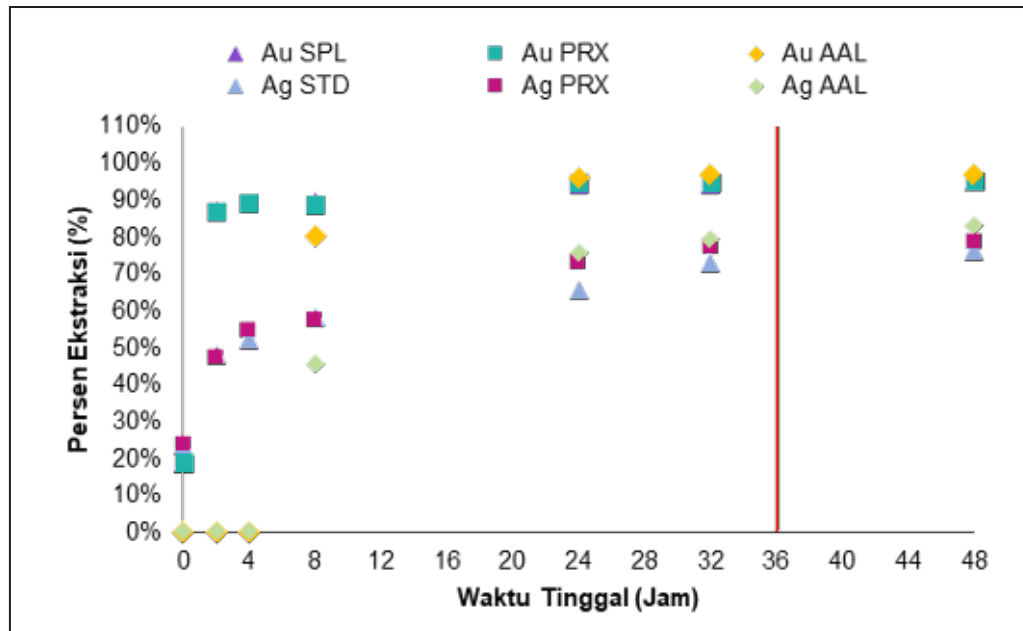
Keterangan:

M di sln : Massa Logam di Solution

M di Tail : Massa Logam di Tail Solid

Setelah dihitung, data tersebut disajikan dalam Gambar 2, memungkinkan pengamatan tren pada grafiknya. Hasil pengujian ekstraksi emas dan perak pada berbagai teknik, seperti SPL, PRI, dan RHS, ditampilkan dalam Gambar 2, di mana efek teknik terlihat secara visual.

Berdasarkan persen ekstraksi emas dari ketiga teknik peningkatan DO, teramati bahwa pada jam ke-24 semua teknik memiliki kecenderungan stabil hingga jam berikutnya dengan persen ekstraksi emas tertinggi pada jam ke-48 yaitu pada teknik RHS sebesar 97,06% sementara untuk SPL dan PRI lebih rendah dibandingkan dengan teknik RHS sebesar 95,25 % dan 95,22%. Ekstraksi yang dihasilkan dari teknik peningkatan DO SPL



Gambar 2. Pengaruh waktu tinggal terhadap hasil ekstraksi dari masing-masing teknik

dan PRI tidak terlalu berbeda. Demikian pula, ekstraksi perak mencapai puncaknya pada 82,82% pada 48 jam, dan stabil mulai dari 24 jam. Namun, pada jam ke- 48 jam ekstraksi, teknik SPL dan PRI diamati berbeda sekitar 2,64 persen, menghasilkan 76,00 % dan 78,64% perak.

Pada waktu tinggal 32 jam, hasil pengujian menunjukkan bahwa teknik SPL memiliki persentase rata-rata ekstraksi Au dan Ag masing-masing sebesar 94,3 % dan 72,7 %; teknik PRI memiliki persentase 94,8 % dan 77,1 %, dan teknik RHS memiliki persentase 96,7 % dan 79,5 %. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa RHS merupakan metode dengan persentase ekstraksi emas dan perak

tertinggi. Hal ini dapat dilihat bahwa ekstraksi perak masih terus meningkat dibandingkan dengan ekstraksi emas yang secara umum akan stabil karena telah mencapai kejenuhan dalam reaksi, hal ini disebabkan karena laju kelarutan perak lebih lambat dibandingkan dengan emas namun akan meningkat dengan cepat seiring kenaikan konsentrasi sianida yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Dai & Breuer, 2013).

Nilai DO yang dihasilkan dari masing-masing teknik merupakan hasil dari perbedaan teknik untuk menghasilkan oksigen terlarut dengan masukan oksigen yang sama dari *oxygen plant* yaitu *flow* 548 kg/jam; kadar 90%-93% (berdasarkan data operasional tahun 2021-2022).

3.2. Analisa Hasil Konsumsi Sodium

Sianida

Hasil dari pengujian didapatkan konsumsi reagen pelindian yaitu sodium sianida. Perhitungan konsumsi sodium sianida dari ketiga teknik peningkatan DO ini dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$K.NaCN = \frac{\text{Titration} \times V.Sln}{\% NaCN \times 10^6} \times \frac{1000}{W.Sld}$$

Keterangan:

K.NaCN : Konsumsi NaCN (kg/t)

Titration : Hasil Titration (ppm)

% NaCN : Kemurnian NaCN yang digunakan

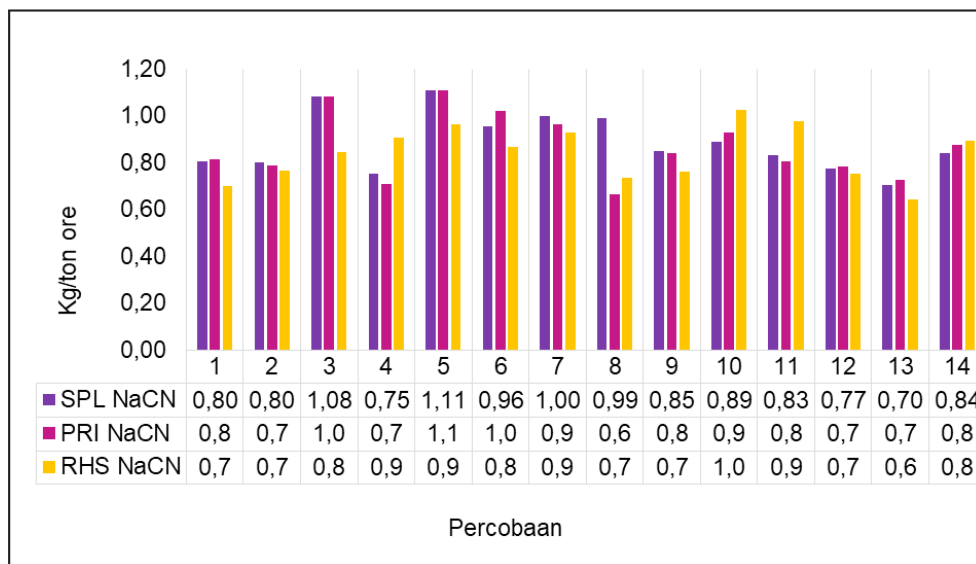
W. Sld : Berat solid awal dari slurry

Hasil perhitungan konsumsi sodium sianida didapati data pada grafik 3 Teramati bahwa

konsumsi tertinggi dari rata-rata konsumsi sodium sianida adalah teknik SPL, kemudian diikuti oleh teknik PRI dan RHS secara berurutan yaitu sebesar 0,88 kg/t, 0,87 kg/t, 0,84 kg/t pada waktu tinggal 48 jam.

Berdasarkan data waktu tinggal selama 48 jam, dapat dilihat bahwa teknik SPL menunjukkan konsumsi reagen pelindi NaCN yang paling tinggi. Hal ini terjadi karena mekanisme reaksi oksigen dalam teknik SPL berjalan secara lambat, sehingga NaCN tidak digunakan secara efisien. Di sisi lain, teknik PRI menunjukkan konsumsi NaCN yang lebih rendah karena peroksida mampu menghasilkan banyak oksigen reaktif (OH⁻) yang dapat mempercepat reaksi, menjadikannya pilihan yang lebih efisien daripada teknik SPL (Zmirli et al., 2022).

Salah satu solusi yang menarik adalah



Gambar 3. Hasil konsumsi natrium sianida dari setiap percobaan

penggunaan teknik peningkatan DO RHS (Reaktor *High Shear*), yang menggunakan tekanan tinggi untuk mendispersi oksigen menjadi gelembung-gelembung sangat kecil, meningkatkan luas permukaan kontak antara oksigen dan bijih. Dengan prinsip yang serupa dengan *nanobubble*, metode ini berhasil menghasilkan lebih banyak oksigen terlarut dibandingkan dengan teknik lainnya (Widiastuti, 2021). Sebagai hasilnya, teknik RHS mencapai persentase ekstraksi emas dan perak tertinggi, masing-masing 97,1% dan 82,8%. Selain itu, konsumsi NaCN pada teknik RHS lebih rendah, hanya sekitar 0,84 kg/ton bijih dalam waktu 48 jam, seperti yang terlihat dalam Gambar 3.

Penemuan ini memiliki potensi yang menjanjikan dalam pengolahan bijih logam, khususnya dalam meningkatkan efisiensi ekstraksi logam berharga dan mengurangi konsumsi reagen berbahaya. Dengan terus mengembangkan dan menerapkan teknik peningkatan DO RHS, diharapkan industri metalurgi dapat memperoleh manfaat positif dalam upaya mencapai proses pelindian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Studi lebih lanjut dan eksperimen yang cermat diharapkan dapat membuka peluang baru dalam peningkatan proses pelindian bijih logam yang berkelanjutan dan inovatif (Lotz et al., 2015).

3.3. Analisa Nilai Keekonomian Hasil Ekstraksi dan Konsumsi Natrium Sianida

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pemanfaatan teknik dalam meningkatkan oksigen terlarut yang menjadi faktor pembatas laju reaksi dalam proses sianidasi. Selain itu, penelitian ini juga melakukan analisis nilai keekonomian untuk mengestimasi pendapatan kotor (*revenue*) dari penggunaan reagen NaCN dan peroksida, serta mencakup nilai ekstraksi emas dan perak, serta capex dan opex yang terlibat dalam penggunaan alat pada proses ini. Analisis nilai keekonomian ini berfokus pada penggunaan reagen NaCN dan peroksida dalam proses sianidasi, sementara penggunaan kapur (*lime*) diasumsikan tetap konstan. Dengan demikian, penelitian ini dapat secara lebih khusus menilai efektivitas dan efisiensi dari penggunaan reagen NaCN dan peroksida dalam meningkatkan oksigen terlarut dan hasil ekstraksi emas dan perak, tanpa adanya variasi penggunaan kapur.

Hasil perhitungan nilai penggunaan NaCN, peroksida, serta nilai emas dan perak yang terekstrak disajikan secara rinci dalam Tabel 1 dan 2. Data-data ini telah melalui analisis yang mendalam dan menghasilkan estimasi pendapatan kotor dari masing-masing teknik serta biaya penggunaan alat yang terlibat dalam proses sianidasi. Penelitian ini memiliki relevansi penting dalam konteks pengolahan bijih logam, terutama dalam upaya

Tabel 1. Biaya penggunaan reagen natrium sianida (NaCN) pada setiap percobaan (*batch*)

| ID Sample | SPL (\$/Day) | PRI (\$/Day) | RHS (\$/Day) |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| B01 | 1721,97 | 1746,23 | 1499,96 |
| B02 | 1712,04 | 1689,70 | 1638,91 |
| B03 | 2313,86 | 2313,86 | 1804,71 |
| B04 | 1613,28 | 1520,19 | 1944,00 |
| B05 | 2375,07 | 2375,07 | 2066,36 |
| B06 | 2045,02 | 2182,51 | 1851,22 |
| B07 | 2142,22 | 2066,38 | 1984,51 |
| B08 | 2114,53 | 1418,24 | 1576,83 |
| B09 | 1817,85 | 1794,58 | 1632,54 |
| B10 | 1903,18 | 1985,68 | 2195,53 |
| B11 | 1775,91 | 1723,19 | 2086,70 |
| B12 | 1653,82 | 1680,18 | 1610,08 |
| B13 | 1507,54 | 1558,10 | 1377,14 |
| B14 | 1797,29 | 1870,05 | 1911,97 |
| Rerata | 1892,40 | 1851,71 | 1798,60 |
| Min | 1507,54 | 1418,24 | 1377,14 |
| Max | 2375,07 | 2375,07 | 2195,53 |

Table 2. Perhitungan biaya penggunaan reagen peroksida dalam setiap percobaan (*batch*)

| ID Sample | Injeksi (mL) | Injeksi (L/m ³) | Injeksi (m ³ /day) | Cost (\$/Day) |
|---------------|--------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------|
| B01 | 4,00 | 0,80 | 6.817 | 3.692,6 |
| B02 | 4,00 | 0,80 | 7.323 | 3.966,9 |
| B03 | 4,00 | 0,80 | 6.774 | 3.669,1 |
| B04 | 4,00 | 0,80 | 6.002 | 3.251,2 |
| B05 | 4,00 | 0,80 | 7.197 | 3.898,1 |
| B06 | 4,00 | 0,80 | 7.717 | 4.180,2 |
| B07 | 4,00 | 0,80 | 7.183 | 3.890,7 |
| B08 | 4,00 | 0,80 | 8.026 | 4.347,7 |
| B09 | 4,00 | 0,80 | 6.184 | 3.349,7 |
| B10 | 4,00 | 0,80 | 7.715 | 4.178,8 |
| B11 | 4,00 | 0,80 | 7.656 | 4.147,0 |
| B12 | 4,00 | 0,80 | 7.985 | 4.325,2 |
| B13 | 4,00 | 0,80 | 7.360 | 3.986,9 |
| B14 | 4,00 | 0,80 | 7.150 | 3.873,0 |
| Rerata | 4,00 | 0,80 | 7.226,1 | 3.911,2 |
| Min | 4,00 | 0,80 | 6.002 | 3.251 |
| Max | 4,00 | 0,80 | 8.026 | 4.348 |

meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan proses sianidasi. Dengan memahami nilai keekonomian dari penggunaan reagen NaCN dan peroksida, diharapkan industri metalurgi dapat mengambil langkah-langkah yang lebih tepat dalam memperbaiki dan mengoptimalkan proses sianidasi guna mencapai hasil yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Dengan demikian, hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan bagi perkembangan teknologi dan praktik pengolahan bijih logam, serta memberikan landasan yang kuat bagi pengambilan keputusan dalam implementasi teknik injeksi oksigen untuk meningkatkan efisiensi proses sianidasi dalam industri metalurgi.

Estimasi profit dari perbandingan teknik SPL dengan RHS, serta teknik PRI dengan RHS. Data yang dijadikan dasar dalam pembuatan grafik mencakup rata-rata tonase sebesar 4.713 dtpd, kadar emas sebesar 0,74 gpt, dan kadar

perak sebesar 25,60 gpt. Grafik yang dihasilkan memberikan gambaran visual yang lebih jelas mengenai potensi keuntungan yang dapat diperoleh dari penerapan teknik SPL dan PRI dibandingkan dengan teknik RHS dalam proses sianidasi emas dan perak. Dengan melihat grafik ini, dapat diperoleh wawasan yang lebih mendalam tentang efisiensi dan performa dari masing-masing teknik peningkatan oksigen.

Informasi yang tergambar dalam grafik ini memiliki nilai penting dalam industri pengolahan bijih logam, karena membantu para profesional dan pengambil keputusan dalam memahami perbedaan dan keuntungan yang dapat diperoleh dari masing-masing teknik. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang estimasi profit, diharapkan industri metalurgi dapat mengoptimalkan proses sianidasi dengan cara yang lebih efektif dan efisien, sehingga meningkatkan hasil produksi dan keuntungan perusahaan secara keseluruhan.

Tabel 3. Analisa biaya manfaat ketiga teknik peningkatan oksigen terlarut

| Teknik | Biaya Tidak Langsung (\$/Day) | Biaya NaCN (\$/Day) | Au (%) | Ag (%) | Logam Produksi (Kg Aueq) | Produksi Au (oz) | Produksi Ag (oz) | Kadar Tail Au (gpt) | Kadar Tail Ag (gpt) |
|--------|-------------------------------|---------------------|--------|--------|--------------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| SPL | - | 1892,4 | 95 | 76 | 4,54 | 107 | 2.949 | 0,04 | 6,15 |
| PRI | 3.911 | 1851,7 | 95 | 79 | 4,59 | 107 | 3.051 | 0,04 | 5,47 |
| RHS | 970 | 1798,6 | 97 | 83 | 4,72 | 109 | 3.213 | 0,02 | 4,40 |

Analisis biaya manfaat merupakan metodologi bisnis utama yang sangat relevan untuk mengevaluasi implikasi keuangan dari sebuah keputusan proyek tertentu (Tabel 3). Penting bagi istilah masukan dan keluaran dalam analisis ini untuk dapat dibandingkan dengan menggunakan satuan ukuran yang sama (Owen et al., 2021). Dalam konteks penelitian ini, konsep yang sama berlaku pada analisis penggunaan oksigen terhadap ketiga teknik peningkatan DO. Setiap teknik ini menghasilkan *output* yang berbeda, sehingga memungkinkan perbandingan dari segi hasil ekstraksi, konsumsi reagen NaCN, serta biaya tidak langsung seperti biaya operasional modal (CAPEX), dan operasional (OPEX) dari alat yang digunakan. Dalam analisis biaya manfaat, penting untuk mencatat bahwa hasil ekstraksi merupakan indikator penting dari efisiensi dan keberhasilan teknik peningkatan DO dalam proses sianidasi. Metode reaktor *high shear* (RHS) telah terbukti mencapai tingkat ekstraksi tertinggi, yaitu sebesar 97,06%, dibandingkan dengan teknik *sparger lance* (SPL) dan *peroxide injection* (PRI). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan teknik RHS dapat memberikan manfaat yang signifikan bagi PT Indo Muro Kencana (IMK) dalam mencapai hasil yang optimal.

Selain itu, perhitungan konsumsi reagen NaCN juga menjadi faktor krusial. Penggunaan reagen yang lebih efisien dapat berkontribusi

pada penghematan biaya yang signifikan bagi perusahaan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa teknik RHS menggunakan jumlah reagen NaCN yang paling rendah, yaitu sekitar 0,84 kg per ton bijih dalam waktu tinggal selama 48 jam. Hal ini mengonfirmasi keunggulan teknik RHS dalam efisiensi penggunaan reagen, yang pada gilirannya dapat meningkatkan keuntungan perusahaan.

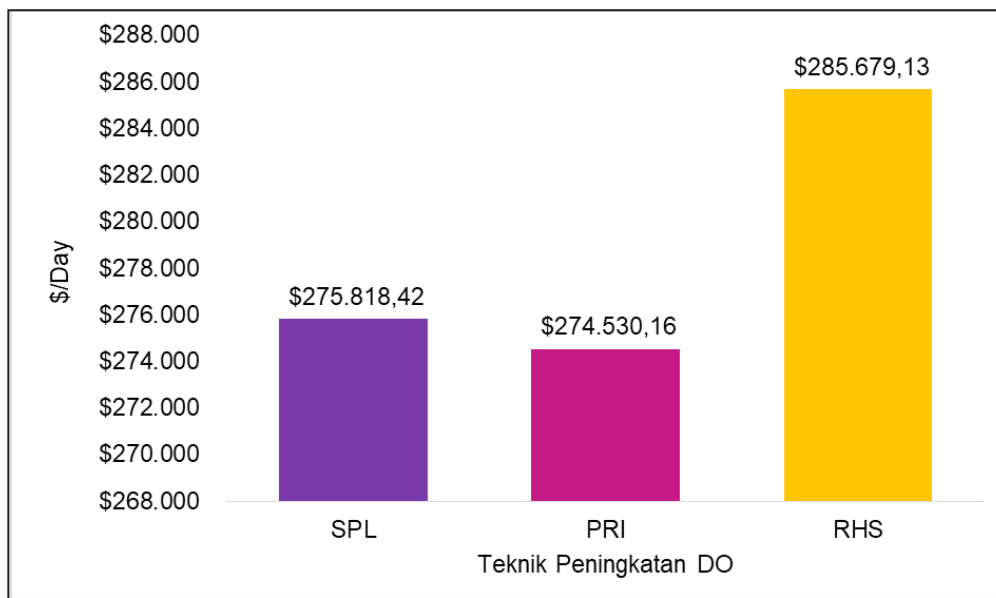
Selain biaya langsung seperti konsumsi reagen, analisis biaya manfaat juga mencakup biaya tidak langsung yang meliputi biaya operasional, CAPEX, dan OPEX dari alat yang digunakan. Evaluasi keseluruhan biaya ini menjadi penting dalam menilai efektivitas dan profitabilitas dari setiap teknik peningkatan DO. Data hasil perhitungan menunjukkan bahwa teknik RHS menghasilkan nilai ekonomis tertinggi sebesar 285.679,13 USD per hari. Angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai ekonomis dari teknik SPL dan PRI. Hal ini membuktikan bahwa penerapan teknik RHS sebagai metode terbaru di PT IMK merupakan keputusan yang tepat dalam meningkatkan efisiensi operasional dan profitabilitas perusahaan. Analisis ini merupakan alat yang efektif dalam membandingkan dan mengevaluasi ketiga teknik peningkatan DO yang diimplementasikan di PT IMK (Owen et al., 2021; Yang et al., 2021). Dengan mempertimbangkan hasil ekstraksi, konsumsi reagen, dan biaya tidak

langsung, teknik reaktor *high shear* (RHS) terbukti sebagai pilihan yang paling efisien dan menguntungkan untuk perusahaan. Keputusan untuk mengadopsi teknik RHS sebagai metode terbaru menegaskan komitmen PT IMK dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi dalam aktivitas pengolahan mineral. Dengan demikian, teknik RHS dapat menjadi suatu rekomendasi penting bagi PT IMK.

Setelah melihat nilai ekstraksi, konsumsi reagen, dan biaya *Capital Expenditure* (CAPEX) serta *Operasional Expenditure* (OPEX) dari alat reaktor dan biaya reagen yang digunakan setiap harinya, terlihat bahwa profit yang dihasilkan dari ketiga teknik peningkatan dapat dilihat dalam Gambar 4 tersebut.

Pertimbangan atas semua faktor yang berpengaruh terhadap hasil keuntungan telah diambil dengan cermat, termasuk efisiensi ekstraksi, penggunaan reagen, dan biaya modal serta operasional alat reaktor. Gambar 4 yang disajikan memberikan pandangan yang jelas mengenai potensi profit dari masing-masing teknik, dan dapat membantu dalam pengambilan keputusan untuk memilih teknik yang paling efektif dan menguntungkan bagi perusahaan.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan di Afrika Selatan, telah menunjukkan bahwa evaluasi manfaat dalam pengolahan bijih yang berkualitas berubah-ubah dapat dilakukan secara konservatif dengan mempertimbangkan



Gambar 4. Potensi profit dari masing masing teknik (hasil perhitungan revenue)

perbedaan residu dan penghematan sianida. Dalam konteks perkiraan kasar biaya-manfaat, perbedaan-perbedaan seperti tambahan perolehan emas sebesar 0,048 g/t dan penghematan sianida sebesar 0,320 kg/t dapat diaplikasikan. Integrasi angka-angka ini dengan produksi pabrik historis sekitar 300.000 t/bulan menunjukkan manfaat sekitar US\$0,5 juta untuk perolehan emas tambahan dan penghematan sekitar US\$0,2 juta untuk sianida. Dengan membandingkannya dengan perkiraan *OPEX* sebesar US\$50.000 per bulan, penerapan ini menunjukkan rasio biaya/manfaat yang sebanding dengan studi kasus sebelumnya dan diharapkan memberikan kontribusi besar terhadap keuntungan (Lotz et al., 2015). Sehingga, perusahaan dapat mengevaluasi performa dan efektivitas teknik peningkatan yang diterapkan, serta merencanakan strategi untuk meningkatkan profitabilitas dalam jangka panjang. Pendekatan yang cermat dan data yang akurat diharapkan dapat mendorong industri metalurgi untuk terus berinovasi dan meningkatkan kinerja operasional guna mencapai hasil yang lebih menguntungkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perbandingan nilai ekonomis, teknik reaktor *high shear* (RHS) menonjol sebagai pilihan terbaik dengan nilai sebesar 285.679,13 USD per hari, mengungguli kedua teknik lainnya. Hal ini menandakan bahwa

RHS adalah solusi yang lebih efektif dalam mengatasi bijih dengan kandungan sulfida dan viskositas *slurry* yang tinggi, serta mampu meningkatkan ekstraksi emas dan perak hingga 97,06% dengan penggunaan reagen yang paling efisien yaitu 0,84 kg per ton bijih. Keputusan untuk mengadopsi teknik RHS sebagai metode terbaru di PT IMK menunjukkan komitmen perusahaan dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi proses sianidasi untuk mencapai hasil yang menguntungkan, serta membuktikan keunggulannya sebagai opsi terbaik untuk pengolahan mineral yang lebih efisien dan berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PEP Bandung dan Direksi PT Indo Muro Kencana atas kesempatan untuk melakukan penelitian. Ucapan terima kasih ini disampaikan karena dukungan dan kesempatan yang memungkinkan kami untuk mengembangkan pengetahuan dan kontribusi dalam bidang metalurgi. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi yang positif bagi perusahaan.

6. DAFTAR PUSTAKA

Anderson, C. G. (2016). Alkaline sulfide gold leaching kinetics. *Minerals Engineering*, 92, 248–256. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.01.009>

- Aylmore, M. G. (2016). Alternative Lixivants to Cyanide for Leaching Gold Ores. *Gold Ore Processing*, 447–484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>
- Bas, A. D., Safizadeh, F., Ghali, E., & Choi, Y. (2016). Leaching and electrochemical dissolution of gold in the presence of iron oxide minerals associated with roasted gold ore. *Hydrometallurgy*, 166, 143–153. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2016.10.001>
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *Handbook of Clay Science* (2nd ed., Vol. 5). <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-clay-science/bergaya/978-0-08-099364-5>
- Celep, O., Altinkaya, P., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2018). Thiosulphate leaching of silver from an arsenical refractory ore. *Minerals Engineering*, 122, 285–295. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.04.011>
- Dai, X., & Breuer, P. L. (2013). Leaching and electrochemistry of gold, silver and gold–silver alloys in cyanide solutions: Effect of oxidant and lead(II) ions. *Hydrometallurgy*, 133, 139–148. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2013.01.002>
- Gui, Q., Fu, L., Hu, Y., Di, H., Liang, M., Wang, S., Zhang, L., & Dong, E. (2023). Oxidative pretreatment of refractory gold ore using persulfate under ultrasound for efficient leaching of gold by a novel eco-friendly lixiviant: Demonstration of the effect of particle size and economic benefits. *Hydrometallurgy*, 221, 106110. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2023.106110>
- Guo, P., Wang, S., & Zhang, L. (2019). Selective removal of antimony from refractory gold ores by ultrasound. *Hydrometallurgy*, 190, 105161. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2019.105161>
- Huang, D., & Kilic, M. (2019). Gold, platinum, and expected stock returns. *Journal of Financial Economics*, 132(3), 50–75. <https://doi.org/10.1016/J.JFINECO.2018.11.004>
- Ince, C. (2019). Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117871. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117871>
- Konadu, K. T., Huddy, R. J., Harrison, S. T. L., Osseo-Asare, K., & Sasaki, K. (2019). Sequential pretreatment of double refractory gold ore (DRGO) with a thermophilic iron oxidizing archaeon

and fungal crude enzymes. *Minerals Engineering*, 138, 86–94. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2019.04.043>

Konadu, K. T., Mendoza, D. M., Huddy, R. J., Harrison, S. T. L., Kaneta, T., & Sasaki, K. (2020). Biological pretreatment of carbonaceous matter in double refractory gold ores: A review and some future considerations. *Hydrometallurgy*, 196, 105434. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2020.105434>

Lotz, P., Van Der Merwe, J., Mogashoa, S., Flatman, S., & Imhof, R. (2015). *Aachen Reactors TM, a proven system to realize hidden economic potentials*. 195–210.

Owen, J. R., Kemp, D., & Marais, L. (2021). The cost of mining benefits: Localising the resource curse hypothesis. *Resources Policy*, 74, 102289. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2021.102289>

Pratomo, S. T. A. (2014). Optimization Gold Cyanidation Process to Increase Gold Extraction at Pongkor Gold Mining Business Unit Indonesia. In *Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 1081–1089). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_105

Snyders, C. A., Akdogan, G., Bradshaw, S. M., van Vreden, J. H., & Smith, R. (2018).

The development of a caustic pre-leaching step for the recovery of Au from a refractory ore tailings heap. *Minerals Engineering*, 121, 23–30. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.02.014>

Soto, C. (2020). *Do Clay Minerals affect the thickener operation in Chuquicamata mine, Calama, Chile?*

Wang, H., Zhang, X., Zhu, M., & Tan, W. (2015). Effects of dissolved oxygen and carbon dioxide under oxygen-rich conditions on the biooxidation process of refractory gold concentrate and the microbial community. *Minerals Engineering*, 80, 37–44. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2015.06.016>

Widiastuti, N. N. A. (2021, July 12). *Perbedaan Microbubble Dan Nanobubble*. Nanobubble.Id. <https://nanobubble.id/blog/perbedaan-microbubble-dan-nanobubble>

Yang, W. D., Sun, Q., & Ni, H. G. (2021). Cost-benefit analysis of metal recovery from e-waste: Implications for international policy. *Waste Management*, 123, 42–47. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.01.023>

Yanuar, E., & Suprpto. (2015). Leaching and Adsorption of Gold from Lape-Sumbawa Rocks (Indonesia) by Hypochlorite-

Chloride. *Procedia Chemistry*, 17, 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.PROCHE.2015.12.134>

Zmirli, Z., Driouich, A., El harfaoui, S., Mohssine, A., Mountacer, H., Sallek,

B., & Chaair, H. (2022). Assessment of the principal factors influencing the silver cyanidation process by using Plackett-Burman experimental design. *Scientific African*, 16, e01137. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2022.E01137>



Pedoman penulisan artikel/makalah dalam jurnal “Applied geo-mining and metallurgy”

Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, KESDM

<https://pepbandung.ac.id/>

- A. Jurnal “*Applied geo-mining and metallurgy*” merupakan jurnal dengan akses terbuka (*open acces journal*) menggunakan sistem penelaahan “*double blind review*”. Editor bertanggung jawab penuh atas keputusan final terkait diterima atau ditolaknya sebuah makalah/artikel. Keputusan editor bersifat final.
- B. Tujuan dari jurnal “*Applied geo-mining and mettalurgy*” adalah untuk menyediakan sarana publikasi bagi makalah-makalah yang menampilkan perkembangan terbaru dalam bidang geologi, pertambangan, pengolahan mineral, metalurgi ekstraktif dan bidang ilmu kebumian lainnya.
- C. Makalah meliputi hasil penelitian dan praktis (operasi), ulas balik/tinjauan (*review*) yang belum pernah dipublikasikan pada jurnal lain,
- D. Cakupan jurnal meliputi energi, geologi eksplorasi, eksploitasi/teknik penambangan mineral dan non mineral, geologi teknik, hidrogeologi, *physical & chemical separation methods*, seperti *flotation concentration dan dewatering, bio-, hydro-, dan electro-metallurgy*, serta isu lingkungan dalam bidang geologi, pertambangan dan metalurgi.
- E. Makalah dapat ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris
- F. Format penulisan
- Makalah ditulis dalam MS Word, A4, Spasi 2
 - Jenis huruf Times New Roman 12, dilengkapi “continuous line numbers”
 - Sub judul dan sub-sub judul harus diberi nomor 1 (kemudian 1.1 dst)

G. Susunan makalah

format “APA 6th edition”

Makalah/artikel terdiri dari :

(1) Judul/Tittle

- Judul makalah ditulis dalam 2 bahasa (Indonesia & Inggris).
- Pada bagian bawah judul dilengkapi dengannama penulis, afiliasi/institusi dan email.
- Dilengkapi kata kunci/keyword maksimal 5 kata

(2) Abstrak/abstract

- Abstrak ditulis dalam 2 bahasa (Indonesia & Inggris), ditulis dalam 1 paragraf, terdiri dari 100-300 kata.

(3) Pendahuluan/*Introduction*

(4) Metodologi/*Method*

(5) Hasil/*Results*

(6) Pembahasan/*Discussion*

(7) Kesimpulan/*Conclusion*

(8) Daftar Pustaka/*References*

- Penulisan daftar pustaka menggunakan *reference manager software* dengan

H. Format Gambar

- Disajikan/di *insert* menyatu dalam teks (tidak disimpan pada akhir makalah)
- Gambar/foto disajikan tanpa kompresi dalam format file TIFF, JPG dan sejenisnya dengan resolusi minimal 400 dpi.
- Caption/penjelasan gambar ditulis pada bagian bawah gambar

I. Format Tabel

- Disajikan/di *insert* menyatu dalam teks (tidak disimpan pada akhir makalah)
- Tabel disajikan dalam bentuk *editable text* (bukan format jpg dan sejenisnya)
- Caption/penjelasan tabel ditulis pada bagian atas tabel.

J. Makalah/artikel dapat dikirim melalui email: jurnal_pepbandung@yahoo.com



Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Jl. Jend. Sudirman No. 623 Bandung 40211,
Telp: 0822-1999-5001
Website: <https://pepbandung.ac.id>

