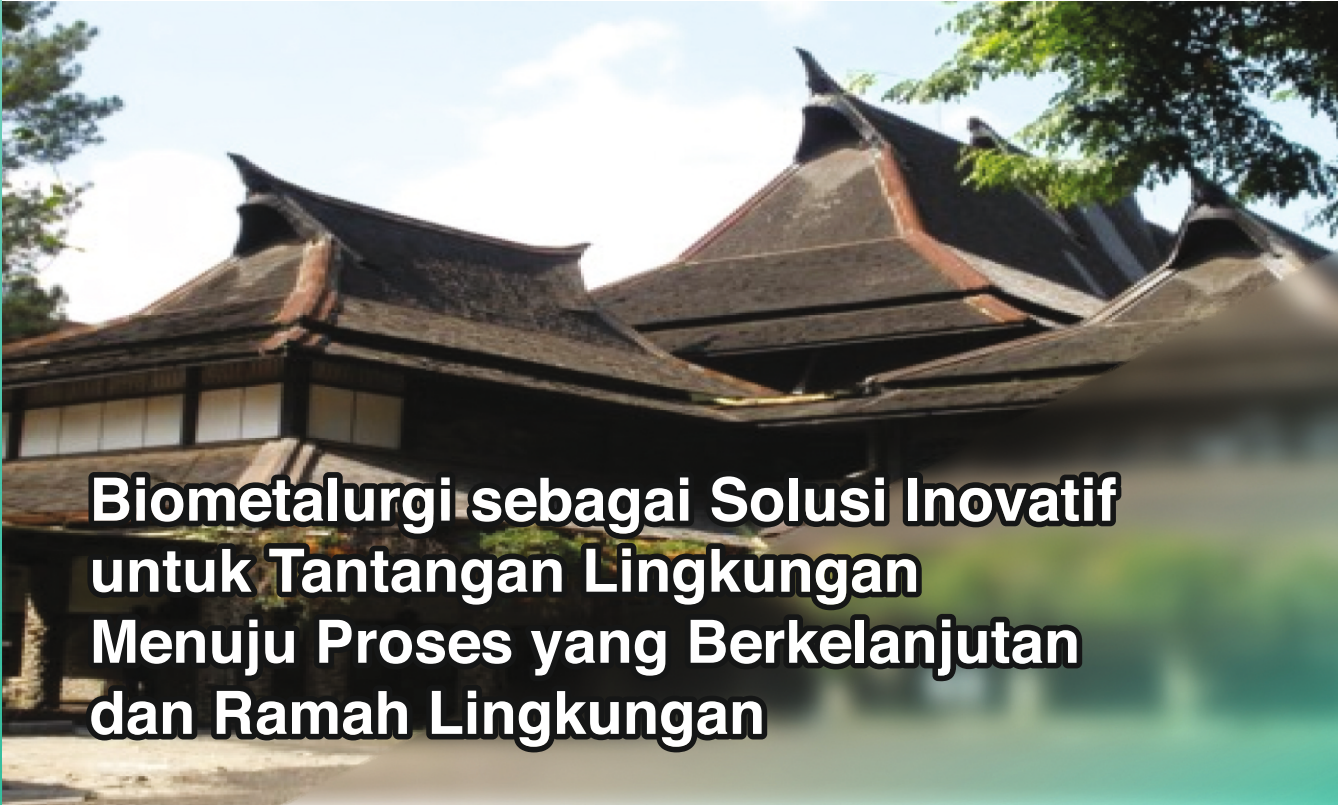




FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**Biometalurgi sebagai Solusi Inovatif
untuk Tantangan Lingkungan
Menuju Proses yang Berkelanjutan
dan Ramah Lingkungan**

Profesor Siti Khodijah Chaerun

**Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
21 September 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**BIOMETALURGI SEBAGAI SOLUSI
INOVATIF UNTUK TANTANGAN
LINGKUNGAN MENUJU PROSES
YANG BERKELANJUTAN
DAN RAMAH LINGKUNGAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**BIOMETALURGI SEBAGAI SOLUSI
INOVATIF UNTUK TANTANGAN
LINGKUNGAN MENUJU PROSES
YANG BERKELANJUTAN
DAN RAMAH LINGKUNGAN**

Prof. Siti Khodijah Chaerun

21 September 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Biometalurgi sebagai Solusi Inovatif untuk Tantangan Lingkungan Menuju Proses yang Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan

Penulis : Prof. Siti Khodijah Chaerun

Reviewer : Prof. Mohammad Zaki Mubarok

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-569-9

e-ISBN : 978-623-297-570-5 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Buku ini disusun untuk Orasi Ilmiah dalam pengukuhan Guru Besar di bidang Biometalurgi. Biometalurgi adalah bidang yang sedang berkembang dalam ilmu metalurgi karena kebutuhan mendesak akan proses metalurgi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Hal ini didorong oleh fakta bahwa Indonesia kaya akan mineral dengan jumlah dan keanekaragaman yang melimpah, tetapi aktivitas pertambangan sering kali menimbulkan masalah lingkungan. Selain itu, bijih sulfida berkadar tinggi semakin berkurang dan yang tersisa adalah bijih sulfida berkadar rendah serta bijih oksida baik berkadar tinggi maupun rendah. Solusi terbaik untuk mengolah mineral tersebut adalah melalui teknologi bioteknologi dan *bioengineering* yang memanfaatkan mikroorganisme (bakteri, archaea, dan fungi) dan tanaman.

Teknologi ini telah berkembang pesat di negara-negara kaya mineral seperti Chile, China, Australia, Afrika Selatan, dan Brazil, tetapi di Indonesia masih sangat terbatas. Ke depan, diharapkan proses metalurgi bisa lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penguasaan di bidang ini mencakup integrasi ilmu biologi/mikrobiologi, elektrokimia, metalurgi ekstraksi, dan mineralogi. Di tingkat global, telah terbentuk Perkumpulan Ahli Biohidrometalurgi (*International Biohydrometallurgy Society*) yang anggotanya dari berbagai disiplin ilmu yang fokus pada biometalurgi.

Dalam perkembangannya, teknologi ekstraksi logam dan pengolahan limbah hasil metalurgi dan pertambangan membutuhkan pendekatan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan demikian, biometalurgi sangat bermanfaat dalam mengembangkan proses metalurgi yang berkelanjutan dan lebih ramah lingkungan, khususnya dalam ekstraksi logam dan penanganan limbahnya. Harapannya adalah melalui pengembangan teknologi ini, Indonesia dapat membangun industri pertambangan dan metalurgi yang ramah lingkungan dan meningkatkan nilai tambah mineral.

Secara keseluruhan, buku ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan ilmu biometalurgi di Indonesia, memberikan manfaat dalam bidang metalurgi dan mendukung pengajaran serta penelitian di Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan - ITB. Saran dan kritik konstruktif dari pembaca sangat diharapkan untuk penyempurnaan buku ini.

Bandung, 21 September 2024

Prof. Siti Khodijah Chaerun

SINOPSIS

Buku ini disusun untuk menggambarkan ilmu biometalurgi secara komprehensif dalam bidang Teknik Metalurgi. Dalam buku ini, ilmu biometalurgi dibahas secara mendalam dan detail, dimulai dari Pendahuluan yang menjelaskan proses metalurgi dari awal hingga penghasilan logam. Biomining, yang mencakup biooksidasi dan bioleaching, baik mineral sulfida maupun oksida, juga diuraikan. Fitomining, yang merupakan salah satu metode pengkonsentrasian dalam metalurgi menggunakan tanaman, serta *Urban biomining* yang mengekstrak logam target dari limbah elektronik dan limbah baterai, juga dipaparkan. Bioremediasi air asam tambang (AAT) dan limbah metalurgi yang menggunakan mikroba dan tanaman, Bioflotasi untuk memisahkan mineral berharga dari mineral pengotor menggunakan reagen flotasi dari mikroba dan metabolit mikroba, dan Bioflokulasi yang memanfaatkan mikroorganisme sebagai flokulan atau agen flokulasi untuk mengendapkan partikel-partikel kecil menjadi flok yang lebih besar agar dapat dipisahkan lebih mudah dan selektif terhadap mineral tertentu juga dijelaskan. Biomineralisasi melalui proses MICCP (*Microbially induced calcium carbonate precipitation*) yang menggunakan bakteri untuk pembentukan CaCO_3 guna meningkatkan kekuatan beton, Bionanometalurgi dengan teknik sintesis nanopartikel menggunakan mikroba dan tanaman, serta Biokorosi, proses degradasi material, terutama logam, yang dipercepat oleh aktivitas mikroorganisme seperti bakteri melalui mekanisme elektrokimia, juga dibahas. Di akhir bab, buku ini membahas tantangan dan prospek masa depan biometalurgi.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XI
DAFTAR TABEL.....	XV
1 PENDAHULUAN	1
2 BIOMINING	5
2.1 Biooksidasi.....	6
2.2 Biobleaching Mineral Sulfida dan Mineral Oksida	9
3 FITOMINING	23
4 URBAN BIOMINING	27
5 BIOREMEDIASI AIR ASAM TAMBANG (AAT) DAN LIMBAH METALURGI	29
6 BIOFLOTASI	33
7 BIOFLOKULASI.....	37
8 BIOMINERALISASI.....	39
9 BIONANOMETALURGI	43
10 BOKOROSI.....	45
11 TANTANGAN DAN PERSPEKTIF MASA DEPAN DALAM BIOMETALURGI	47
12 PENUTUP	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55
CURRICULUM VITAE.....	61

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1** Urutan proses metalurgi yang disederhanakan ini mencakup pengolahan mineral dan berbagai prosedur metalurgi, dengan penekanan khusus pada posisi biohidrometalurgi dan biometalurgi dalam keseluruhan rangkaian operasi tersebut (Chaerun dkk., 2023 dengan modifikasi).....3
- Gambar 2** Konsumsi sianida (NaCN) dan kapur (*Lime*) selama sianidasi langsung dan sianidasi pada konsentrat yang telah dioksidasi secara biologi (a) sampel A dan (b) sampel B dengan kultur murni AC (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) (A-AC dan B-AC), bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur SKC1 (A-SKC1 dan B-SKC1), serta bakteri mixotrofik pengoksidasi sulfur SKC2 (A-SKC2 dan B-SKC2). A (A-AC, A-SKC1, A-SKC2) untuk sampel A dan B (B-AC, B-SKC1, B-SKC2) untuk sampel B (Mubarok, dkk., 2017).....8
- Gambar 3a** Ekstraksi timbal (Pb) (mg Pb terlarut/kg konsentrat galena) dari konsentrat galena pada bioleaching langsung oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) serta kontrol abiotik bioleaching langsung (tanpa bakteri) dilakukan pada berbagai konsentrasi FeCl_3 (5 dan 15 g/L). Parameter bioleaching yang digunakan adalah inokulum bakteri 15% v/v, persen padatan 2% w/v, molase 20 g/L, NaCl 50 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm selama periode percobaan 7 hari (Chaerun, dkk., 2020)..... 13
- Gambar 3b** Ekstraksi tembaga (Cu) (mg Cu terlarut/kg konsentrat galena) dari konsentrat galena pada bioleaching langsung oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) serta kontrol abiotik bioleaching langsung (tanpa bakteri) dilakukan pada berbagai konsentrasi FeCl_3 (5 dan 15 g/L). Parameter bioleaching yang digunakan adalah inokulum bakteri 15% v/v,

	persen padatan 2% w/v, molase 20 g/L, NaCl 50 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm selama periode percobaan 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).	14
Gambar 3c	Ekstraksi seng (Zn) (mg Zn terlarut/kg konsentrat galena) dari konsentrat galena pada bioleaching langsung oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) serta kontrol abiotik bioleaching langsung (tanpa bakteri) dilakukan pada berbagai konsentrasi FeCl ₃ (5 dan 15 g/L). Parameter bioleaching yang digunakan adalah inokulum bakteri 15% v/v, persen padatan 2% w/v, molase 20 g/L, NaCl 50 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm selama periode percobaan 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).	14
Gambar 4	Pola difraksi sinar-X dari residu konsentrat galena setelah proses bioleaching semi-langsung dan bioleaching langsung. Pada bioleaching semi-langsung, parameter yang digunakan adalah 5% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl ₃ , 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Sementara pada bioleaching langsung, parameter yang digunakan adalah 2% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl ₃ , 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Kedua proses menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) dan dilakukan selama 7 hari percobaan bioleaching (Chaerun, dkk., 2020).	15
Gambar 5	Spektra Fourier transform infrared (FTIR) dari residu konsentrat galena setelah bioleaching semi-langsung dan bioleaching langsung. Pada bioleaching semi-langsung, parameter yang digunakan adalah 5% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl ₃ , 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Sedangkan pada bioleaching langsung, parameter yang digunakan meliputi 2% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl ₃ , 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Kedua metode bioleaching dilakukan menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) selama 7 hari percobaan (Chaerun dkk., 2020).....	16

Gambar 6	Peta SEM-EDS menunjukkan komposisi unsur dari residu konsentrat galena pada bioleaching langsung, dengan parameter bioleaching berupa 2% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl ₃ , 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase, menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) setelah 7 hari percobaan bioleaching (Chaerun, dkk., 2020).....	17
Gambar 7	Pengaruh suhu termasuk 25 °C (A), 65 °C (B), dan 95 °C (C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) (%) dalam bioleaching tidak langsung (<i>indirect bioleaching</i>) pada bijih limonit menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh <i>Aspergillus niger</i> sebagai fungsi waktu (Chaerun dkk., 2017a).	20
Gambar 8	Pengaruh suhu termasuk 25 °C (A), 65 °C (B), dan 95 °C (C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) (%) dalam bioleaching tidak langsung (<i>indirect bioleaching</i>) pada bijih saprolit menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh <i>Aspergillus niger</i> sebagai fungsi waktu (Chaerun, dkk., 2017a).	21
Gambar 9	Konsep fitomining yang diusulkan dalam proses metalurgi untuk mendukung praktik metalurgi yang berkelanjutan (Chaerun, unpublished).....	25
Gambar 10	Skema ilustrasi yang menunjukkan bakteri bioflokulan dapat berperan ganda dalam menurunkan TSS dan meremediasi AAT (Chaerun, dkk., 2023a).	31
Gambar 11a	<i>Recovery</i> dan kadar (%) Pb dan Zn dalam bioflotasi bijih kompleks Pb-Zn menggunakan <i>Alicyclobacillus</i> sp. sebagai bioreagen flotasi pada berbagai konsentrasi sel bakteri. A: untuk Pb dan B: untuk Zn (Sanwani dkk., 2021).	34
Gambar 11b	<i>Recovery</i> dan kadar (%) Si dan Fe dalam bioflotasi bijih kompleks Pb-Zn menggunakan <i>Alicyclobacillus</i> sp. sebagai bioreagen flotasi pada berbagai konsentrasi sel bakteri. C: untuk Si dan D: untuk Fe (Sanwani dkk., 2021).	35
Gambar 12	Indeks pengemulsian (E24) dari enam strain bakteri yang dipilih untuk uji pengendapan. <i>Bacillus velezensis</i>	

strain SKC/S-2 (dengan kode sutina 2) dan *Paenibacillus pasadenensis* strain SKC/S-7 (dengan kode sutina 7) dari batch 1; *Bacillus zanthoxyli* strain SKC/VA-2 (dengan kode VA2) dan *Bacillus nitratreducens* strain SKC/L-2 (dengan kode Lusi 2.1) dari batch 2; serta *Bacillus aryabhatai* strain SKC-5 (dengan kode B) dan *Serratia rubidaea* strain SKC-11 (dengan kode Bismik 8 (L)) dari batch 3 (Sanwani, dkk., 2022). 38

Gambar 13 Gambar stereomikroskopik dari proses penyembuhan sendiri selama 28 hari pada retakan buatan spesimen mortar (dari uji Brasil) tanpa (a) dan dengan (b) kalsium laktat pentahidrat. Kehadiran kalsium laktat pentahidrat terlihat sedikit mempengaruhi presipitasi kalsit. Bakteri yang dikombinasikan dengan kalsium laktat pentahidrat menunjukkan pertumbuhan kristal yang signifikan pada retakan buatan tersebut, yang menunjukkan adanya proses penyembuhan sendiri..... 41

Gambar 14 Proses sintesis nanopartikel tembaga (CuNPs) menggunakan mikroba dan tumbuhan, serta parameter-parameter yang memengaruhi sintesis tersebut dan aplikasinya (Chaerun, dkk., 2022). 44

Gambar 15 Spektrum XRD dari produk korosi yang dihasilkan oleh *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Citrobacter murlinae* (Widyanto dkk., 2020)..... 46

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Analisis unsur sampel konsentrat emas (Mubarok, dkk., 2017)	7
Tabel 2a	Selektivitas bioleaching timbal (Pb) oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) terhadap Cu (S_{Cu}) dan Zn (S_{Zn}) berdasarkan pengaruh variasi konsentrasi $FeCl_3$ dan NaCl serta metode bioleaching semi-langsung (<i>semi-direct bioleaching</i>) selama periode percobaan bioleaching 7 hari (Chaerun dkk., 2020).....	11
Tabel 2b	Selektivitas bioleaching timbal (Pb) oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) terhadap Cu (S_{Cu}) dan Zn (S_{Zn}) berdasarkan pengaruh variasi konsentrasi molase serta metode bioleaching semi-langsung (<i>semi-direct bioleaching</i>) selama periode percobaan bioleaching 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).....	11
Tabel 2c	Selektivitas bioleaching timbal (Pb) oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp,) terhadap Cu (S_{Cu}) dan Zn (S_{Zn}) berdasarkan pengaruh variasi konsentrasi $FeCl_3$ serta metode bioleaching langsung (<i>direct bioleaching</i>) selama periode percobaan bioleaching 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).....	12
Tabel 3	Konsentrasi unsur ^(a) dari konsentrat galena setelah 7 hari bioleaching oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (<i>Citrobacter</i> sp.) dan konsentrat galena awal (Chaerun, dkk., 2020).....	18
Tabel 4	Komposisi kimia bijih limonit dan saprolit yang digunakan dalam penelitian bioleaching tidak langsung (<i>indirect bioleaching</i>) menggunakan asam organik yang dihasilkan sebagai metabolit oleh fungi <i>Aspergillus niger</i> (Chaerun, dkk., 2017a).	19
Tabel 5a	Selektivitas bioleaching nikel oleh asam organik terhadap Fe (S_{Fe}) dan Mg (S_{Mg}) berdasarkan pengaruh variasi suhu (25 °C, 65 °C, dan 95 °C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) dalam bioleaching tidak langsung (<i>indirect bioleaching</i>) pada	

	bijih limonit (Gambar 4) menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh <i>Aspergillus niger</i> selama periode percobaan 24 jam (Chaerun, dkk., 2017a).....	21
Tabel 5b	Selektivitas bioleaching nikel oleh asam organik terhadap Fe (S_{Fe}) dan Mg (S_{Mg}) berdasarkan pengaruh variasi suhu (25 °C, 65 °C, dan 95 °C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) dalam bioleaching tidak langsung (<i>indirect bioleaching</i>) pada bijih saprolit (Gambar 5) menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh <i>Aspergillus niger</i> selama periode percobaan 24 jam (Chaerun, dkk., 2017a).....	22

1 PENDAHULUAN

Proses metalurgi, yang mencakup pengolahan mineral dan operasi metalurgi, melibatkan serangkaian langkah kompleks yang digambarkan secara sederhana pada Gambar 1. Proses ini mencakup urutan langkah fisik, kimia, dan biologi yang digunakan untuk mengekstraksi mineral berharga dari bijih. Dimulai dengan penambangan bijih, yaitu proses ekstraksi bijih dari bumi yang dapat dilakukan melalui berbagai metode seperti penambangan terbuka (*open-pit mining*), penambangan bawah tanah (*underground mining*), penambangan placer (*placer mining*), dan penghilangan puncak gunung (*mountaintop removal mining*). Bijih yang telah ditambang kemudian diangkut ke pabrik pengolahan mineral, di mana bijih tersebut mengalami proses kominusi untuk memperkecil ukuran partikel. Proses ini melibatkan penghancuran, penggilingan, dan penyaringan, yang dirancang untuk meningkatkan luas permukaan untuk memaksimalkan proses pemisahan selanjutnya serta membebaskan mineral berharga yang terperangkap dalam bahan *gangue* (pengotor) (Chaerun, dkk., 2020, 2020a; Mubarok dkk., 2021). Selanjutnya, bijih menjalani proses konsentrasi dengan menggunakan teknik-teknik seperti pemisahan gravitasi, pemisahan magnetik, flotasi, dan flokulasi (Ankireddy, dkk., 2023; Diab, dkk., 2022; Kabatesi, dkk., 2022; Sanwani, dkk., 2022; Sanwani, et al., 2021; Sanwani, et al., 2021a; Sanwani, et al., 2020; Sanwani, et al., 2017; Sanwani, et al., 2016; Sanwani, et al., 2016a; Sanwani, et al., 2015; Sanwani, et al., 2015a; Sanwani, et al., 2015b; Sanwani, et al., 2015c; Sanwani, et al., 2015d; Teniola, et al., 2022; Wahyuningsih, et al., 2020; Wahyuningsih, et al., 2018; Wahyuningsih, et al., 2018; Zheng, et al., 2022). Teknik-teknik ini bertujuan untuk memisahkan mineral berharga dari pengotor. Hasil akhir dari tahap ini adalah konsentrat yang mengandung mineral yang diinginkan dan *tailing* yang merupakan material limbah.

Bijih yang telah terkonsentrasi (konsentrat) kemudian menjalani proses metalurgi ekstraktif, seperti pirometalurgi, hidrometalurgi, dan biohidrometalurgi untuk mengekstraksi logam berharga (Keane, dkk., 2023; Qin, dkk., 2022; Roberto dan Schippers, 2022). Setelah proses ekstraksi, logam yang diperoleh kemudian dimurnikan lebih lanjut untuk menghilangkan pengotor guna mencapai tingkat kemurnian yang diperlukan untuk aplikasi tertentu, menggunakan teknik seperti pemurnian pirometalurgi dan pemurnian hidrometalurgi (Adnan, dkk., 2022; Dong, dkk., 2023;

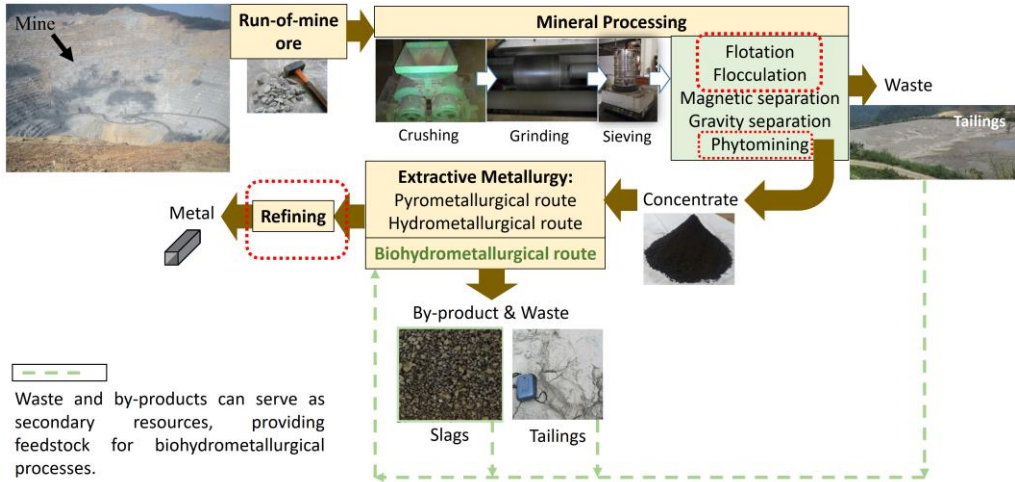
Iturrondobeitia, dkk., 2022; Neumann, dkk., 2022; Raabe, 2023; Sun, 2023). Pemilihan teknik pemurnian ini bergantung pada berbagai faktor, termasuk karakteristik logam, jenis kotoran yang terdapat di dalamnya, serta tujuan atau aplikasi dari logam yang telah dimurnikan.

Seiring dengan itu, pengelolaan *tailing–material* limbah residu yang dihasilkan setelah proses pengolahan mineral dan ekstraksi mineral berharga—serta produk sampingan dari proses metalurgi ekstraktif menjadi sangat penting dalam upaya mitigasi dampak lingkungan. Mengingat *tailing* dan produk sampingan ini sering kali masih mengandung logam berharga dalam jumlah yang signifikan, yang umumnya diklasifikasikan sebagai material berkadar rendah, mereka menawarkan peluang untuk didaur ulang menjadi sumber daya logam sekunder. Material-material ini sangat mungkin cocok untuk diproses menggunakan metode biohidrometalurgi, karena prinsip-prinsip biohidrometalurgi atau biomining sangat efektif diterapkan pada bijih berkadar rendah, limbah metalurgi, atau bijih kompleks yang kurang efisien diolah dengan metode konvensional.

Selain itu, biohidrometalurgi atau biomining adalah cabang dari hidrometalurgi, yang merupakan salah satu cabang utama dalam metalurgi. Biohidrometalurgi umumnya diterapkan pada tahap ekstraksi dalam proses metalurgi, tepat setelah tahap konsentrasi dan sebelum tahap pemurnian. Setelah logam berharga diekstraksi menggunakan metode biohidrometalurgi, logam tersebut dapat dimurnikan lebih lanjut untuk menghilangkan pengotor yang tersisa dan menghasilkan produk logam akhir yang siap digunakan. Dengan demikian, biohidrometalurgi atau biomining memegang peranan penting dalam fase ekstraksi dalam keseluruhan proses metalurgi.

Selain biohidrometalurgi yang berperan sebagai bagian dari metalurgi ekstraktif, terdapat beberapa proses metalurgi lain yang juga melibatkan proses biologi, seperti bioflotasi, bioflokulasi, dan fitomining (*phytomining*) dalam pengolahan mineral. Dalam tahap pemurnian (*refining*), proses biologi juga dapat diterapkan melalui biopresipitasi atau biosementasi, yang sering dikenal sebagai proses biomineralisasi. Meskipun penerapan biomineralisasi dalam konteks pemurnian logam masih dalam tahap penelitian intensif di dunia, metode ini telah banyak digunakan dalam teknik konstruksi, khususnya untuk meningkatkan kekuatan beton dan mortar. Selain itu, proses metalurgi yang bertujuan menghasilkan logam juga dapat menghasilkan

logam dalam bentuk nanometal atau nanopartikel. Proses ini dapat dilakukan dengan pendekatan biologi yang lebih ramah lingkungan dan relatif murah, menggunakan tanaman atau mikroba sebagai agen pereduksi, dalam konteks yang dikenal sebagai bionanometalurgi (Chaerun, dkk., 2022).



Gambar 1 Urutan proses metalurgi yang disederhanakan ini mencakup pengolahan mineral dan berbagai prosedur metalurgi, dengan penekanan khusus pada posisi biohidrometalurgi dan biometalurgi dalam keseluruhan rangkaian operasi tersebut (Chaerun dkk., 2023 dengan modifikasi).

Setelah logam terbentuk, logam tersebut akan mengalami degradasi atau kerusakan akibat kontak dengan lingkungan, yang merupakan bagian dari bidang khusus metalurgi yaitu korosi. Dalam proses korosi, antara 30-80% disebabkan oleh biokorosi, yang diakibatkan oleh aktivitas mikroba, khususnya bakteri pereduksi sulfat (SRB = *sulfate-reducing bacteria*). Selain itu, aktivitas biomining pada mineral sulfida dan batubara sering kali menghasilkan air asam tambang (AAT) serta limbah-limbah metalurgi yang masih mengandung logam. Untuk mencegah pencemaran lingkungan, limbah-limbah ini perlu diolah menggunakan teknologi biologi, baik dengan mikroba maupun tanaman, melalui pendekatan bioremediasi. Secara keseluruhan, semua proses biologi yang terlibat dalam proses metalurgi tersebut dapat kita golongkan ke dalam disiplin ilmu yang dikenal sebagai **biometalurgi**.

2 BIOMINING

Biomining adalah pendekatan inovatif dan ramah lingkungan untuk mengekstraksi logam dari bijih dan material padat lainnya dengan menggunakan organisme hidup, terutama mikroba seperti bakteri, archaea, dan fungi. Proses bioteknologi ini, yang merupakan bagian dari biohidrometalurgi, memanfaatkan kemampuan alami mikroba ini untuk mengoksidasi dan melarutkan logam. Biomining sangat berguna untuk mengekstraksi logam dari bijih kadar rendah dan limbah tambang atau limbah metalurgi, yang sering kali tidak layak diolah secara ekonomis menggunakan metode konvensional. Metode ini semakin banyak diterapkan dalam industri metalurgi untuk produksi logam seperti tembaga, emas, nikel, seng, kobalt, dan bahkan unsur tanah jarang atau logam tanah jarang (LTJ) yang sangat penting untuk berbagai teknologi (Rus, dkk., 2024).

Biooksidasi dan bioleaching adalah dua proses utama dalam biomining. Biooksidasi melibatkan penggunaan mikroba untuk mengoksidasi dan menghilangkan mineral yang tidak diinginkan yang mengganggu ekstraksi logam target, seperti emas. Proses ini sering digunakan sebagai langkah pra-pengolahan untuk meliberasi logam dari bijih refraktori yang mengandung karbonat tinggi, di mana mikroba seperti *Acidithiobacillus* spp. dan *Alicyclobacillus ferrooxydans* memainkan peran penting (Winarko, dkk., 2015; Mubarok, dkk., 2017; Mubarok, dkk., 2021). Di sisi lain, bioleaching mengubah senyawa logam yang tidak larut menjadi bentuk larut, yang memfasilitasi ekstraksi logam seperti tembaga dan uranium dari bijih sulfida. Proses-proses ini memiliki keuntungan karena beroperasi pada suhu yang lebih rendah, membutuhkan energi yang lebih sedikit, dan menghasilkan polutan yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode ekstraksi konvensional, sehingga lebih berkelanjutan dan hemat biaya.

Meskipun memiliki keunggulan, biomining juga memiliki beberapa keterbatasan. Proses ini bisa lebih lambat dibandingkan dengan teknik ekstraksi konvensional dan sangat tergantung pada kondisi lingkungan tertentu seperti pH, suhu, dan ketersediaan nutrisi. Mikroba yang digunakan dalam biomining juga bersifat selektif, hanya menargetkan mineral tertentu, yang dapat membatasi jenis logam yang dapat diekstraksi. Namun demikian, penelitian yang sedang berlangsung dan kemajuan teknologi terus mengatasi tantangan-tantangan ini, dengan upaya untuk meningkatkan efisiensi

mikroba dan memperluas rentang kondisi di mana biomining dapat diterapkan secara efektif. Seiring dengan semakin mendesaknya isu lingkungan dan energi, biomining menawarkan peluang yang menjanjikan untuk ekstraksi dan daur ulang logam secara berkelanjutan, yang berpotensi mengubah industri metalurgi yang berkelanjutan dan lebih ramah lingkungan.

2.1 Biooksidasi

Biooksidasi adalah proses penting dalam biomining, terutama digunakan untuk mengekstraksi logam dari bijih refraktori, seperti emas. Proses ini melibatkan penggunaan mikroba untuk mengoksidasi mineral sulfida yang mengandung logam berharga, sehingga logam tersebut dapat diekstraksi lebih lanjut melalui metode konvensional. Mikroba dalam hal ini bakteri seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans* berperan penting dengan mengoksidasi senyawa sulfur yang ada dalam matriks mineral. Aktivitas mikroba ini menyebabkan pemecahan struktur mineral, memungkinkan logam yang diinginkan lebih mudah diakses untuk diekstraksi. Biooksidasi biasanya dilakukan dalam reaktor tangki besar yang diaduk, yang menyediakan kondisi terkendali untuk mengoptimalkan aktivitas mikroba dan memastikan pengolahan bijih yang efisien.

Proses biooksidasi sangat menguntungkan untuk mengolah bijih emas refraktori yang tidak dapat langsung dilakukan sianidasi karena adanya mineral sulfida. Dengan mengoksidasi mineral sulfida ini, biooksidasi mengubahnya menjadi bentuk yang lebih larut, sehingga membebaskan emas untuk diolah lebih lanjut. Metode ini menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan metode konvensional seperti pirometalurgi atau oksidasi tekanan, termasuk konsumsi energi yang lebih rendah, dampak lingkungan yang lebih kecil, dan kemampuan untuk mengolah bijih dengan konsentrasi logam yang lebih rendah (bijih kadar rendah). Selain itu, biooksidasi adalah alternatif yang hemat biaya, terutama di wilayah dengan biaya energi tinggi atau regulasi lingkungan yang ketat.

Meskipun memiliki keunggulan, biooksidasi juga menghadapi tantangan seperti kebutuhan untuk mengontrol kondisi lingkungan seperti suhu, pH, dan pasokan nutrisi secara tepat untuk mempertahankan aktivitas mikroba yang optimal. Selain itu, proses ini bisa lebih lambat dibandingkan metode

konvensional, yang mungkin membatasi penerapannya dalam konteks tertentu. Namun demikian, penelitian dan kemajuan teknologi yang sedang berlangsung difokuskan pada peningkatan efisiensi dan kecepatan biooksidasi melalui pengembangan strain yang direkayasa secara genetika dan desain reaktor yang lebih baik. Seiring meningkatnya permintaan akan solusi penambangan yang lebih berkelanjutan dan ekonomis, biooksidasi terus menjadi teknologi yang menjanjikan dalam bidang biominer.

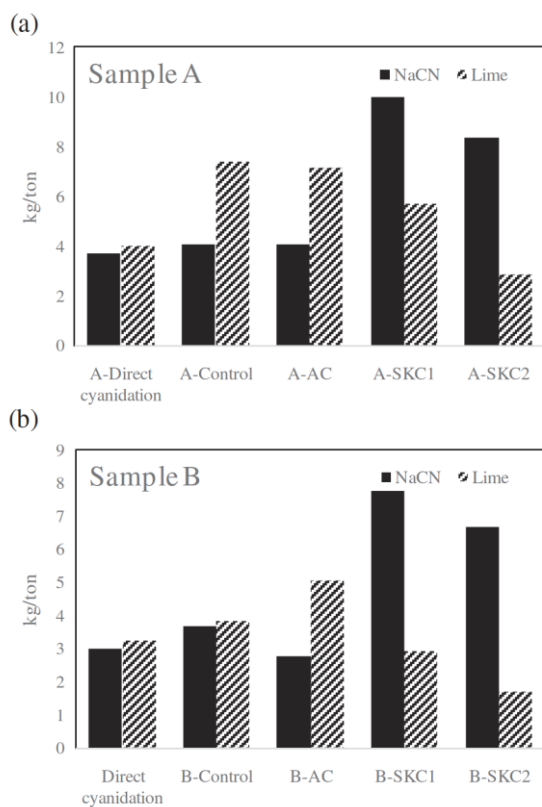
Tabel 1 Analisis unsur sampel konsentrat emas (Mubarok, dkk., 2017)

Unsur	Sampel A (%)	Sampel B (%)
Fe	15,32	4,56
As	0,10	0,11
Pb	0,02	0,11
Cu	0,10	0,02
Al	0,55	0,74
Ca	0,82	4,79
K	0,09	0,31
Mg	0,36	0,37
Si	19,68	24,45
Au (g/t)	7,16	2,48
Ag (g/t)	40	18
Total S	20,55	5
Total C	0,01	1,85

Salah satu contoh penggunaan proses biooksidasi sebagai pra-pengolahan adalah penelitian yang dilakukan oleh Mubarok, dkk. (2017). Dalam penelitiannya, Mubarok, dkk. (2017) mengevaluasi pengaruh pra-pengolahan biooksidasi (BIOX) pada konsentrat emas refraktori menggunakan bakteri mixotrofik dan kemolitotrofik terhadap ekstraksi emas selama proses sianidasi pada pH netral. Serangkaian percobaan biooksidasi dan sianidasi dilakukan pada konsentrat yang telah dioksidasi secara biologi, menggunakan tiga strain bakteri, yaitu dua bakteri mixotrofik (SKC1 dan SKC2) dan satu bakteri kemolitotrofik (*Acidithiobacillus ferrooxidans* atau AC). Dua jenis konsentrat emas refraktori dengan kandungan sulfur tinggi (S >20%; sebagai sampel A) dan kandungan sulfur rendah (S <5%; sebagai sampel B) digunakan dalam penelitian tersebut (Tabel 1).

Hasil percobaan menunjukkan bahwa biooksidasi dengan salah satu dari ketiga bakteri tersebut secara umum memberikan dampak positif terhadap ekstraksi emas (Gambar 2). Ekstraksi emas tertinggi, sebesar 91,4%, dicapai pada konsentrat dengan kandungan belerang tinggi setelah biooksidasi

dengan SKC2 selama 14 hari, yang 18% lebih tinggi dibandingkan dengan sianidasi langsung pada konsentrat tanpa pra-pengolahan. Sebaliknya, biooksidasi dengan AC hanya menghasilkan peningkatan kecil dalam ekstraksi emas dari kedua jenis konsentrat, yang disebabkan oleh pH larutan yang tinggi ($pH > 5,0$), yang tidak ideal untuk pertumbuhan bakteri tersebut. Dilaporkan bahwa konsumsi sianida selama sianidasi konsentrat yang dioksidasi secara biologi dengan kedua bakteri mixotrofik (SKC1 dan SKC2) meningkat secara signifikan, akibat reaksi antara spesies sulfur dan besi yang mengendap selama tahap biooksidasi dengan sianida, yang membentuk ion tiosianat dan ferrosianida.



Gambar 2 Konsumsi sianida (NaCN) dan kapur (*Lime*) selama sianidasi langsung dan sianidasi pada konsentrat yang telah dioksidasi secara biologi (a) sampel A dan (b) sampel B dengan kultur murni AC (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) (A-AC dan B-AC), bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur SKC1 (A-SKC1 dan B-SKC1), serta bakteri mixotrofik pengoksidasi sulfur SKC2 (A-SKC2 dan B-SKC2). A (A-AC, A-SKC1, A-SKC2) untuk sampel A dan B (B-AC, B-SKC1, B-SKC2) untuk sampel B (Mubarok, dkk., 2017).

2.2 Bioleaching Mineral Sulfida dan Mineral Oksida

Bioleaching adalah proses bioteknologi yang menggunakan mikroba untuk mengekstraksi logam dari mineral sulfida dan oksida, menawarkan alternatif yang berkelanjutan dibandingkan dengan metode ekstraksi konvensional. Proses ini sangat efektif untuk mengolah bijih berkadar rendah dan limbah metalurgi, seperti *tailing*, yang sering kali dianggap tidak ekonomis untuk diekstraksi menggunakan teknik konvensional. Dalam bioleaching, mikroorganisme seperti bakteri asidofilik mengoksidasi senyawa sulfur dan besi yang terdapat dalam mineral, sehingga menyebabkan terlarutnya ion logam. Proses ini banyak digunakan untuk ekstraksi logam berharga seperti tembaga, emas, nikel, dan uranium dari bijih sulfida, dan semakin populer juga untuk mineral oksida.

Untuk mineral sulfida, bioleaching melibatkan oksidasi sulfida logam menjadi sulfat logam yang larut. Proses ini dapat terjadi melalui mekanisme langsung atau tidak langsung. Pada bioleaching langsung, mikroba menempel pada permukaan mineral dan langsung mengoksidasi sulfida logam, sedangkan pada bioleaching tidak langsung, mikroba mengoksidasi besi(II) menjadi besi(III), yang kemudian besi(III) secara kimiawi mengoksidasi mineral sulfida. Sulfat logam yang dihasilkan larut dalam air, sehingga memungkinkan ekstraksi logam dengan mudah. Sebagai contoh, dalam kasus bijih tembaga sulfida (Chaerun, dkk., 2017; Chaerun, dkk., 2018), bioleaching adalah metode yang sudah mapan dan secara signifikan mengurangi dampak lingkungan. Contoh lainnya adalah bioleaching timbal (Pb) dari konsentrat galena (Chaerun, dkk., 2020). Metode bioleaching dipilih dalam penelitian tersebut karena proses pirometalurgi, yang telah banyak digunakan untuk ekstraksi Pb hingga saat ini, beroperasi pada suhu tinggi dan menghasilkan materi Pb yang volatil dan karsinogenik, sehingga berpotensi membahayakan kesehatan manusia. Penelitian bioleaching konsentrat galena tersebut menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (diidentifikasi sebagai *Citrobacter* sp.) dengan metode bioleaching semi-langsung (*semi-direct bioleaching*) dan bioleaching langsung (*direct bioleaching*). Bakteri tersebut mampu mengekstraksi timbal (Pb) dari konsentrat galena dengan selektivitas tinggi terhadap tembaga (Cu) dan seng (Zn) (masing-masing 0,99 dan 0,86) (Tabel 2a-c).

Selain itu, dalam kedua teknik bioleaching, yaitu bioleaching langsung dan bioleaching semi-langsung, terbukti bahwa penambahan NaCl (30 g/L atau 50 g/L) tidak meningkatkan ekstraksi Pb dari konsentrat galena. Peningkatan nilai ekstraksi Pb tersebut terutama disebabkan oleh penambahan FeCl₃. Keberadaan FeCl₃ juga berdampak pada pH awal suspensi, di mana konsentrasi FeCl₃ yang lebih tinggi menghasilkan suspensi yang lebih asam. Penurunan pH ini merupakan hasil dari hidrolisis FeCl₃ yang menghasilkan HCl. Selanjutnya, pH suspensi cenderung meningkat seiring waktu sebagai akibat dari oksidasi mineral sulfida yang mengkonsumsi proton (H⁺). Adapun nilai Eh suspensi yang mengandung konsentrasi FeCl₃ yang lebih tinggi (25 g/L) tercatat lebih tinggi dibandingkan dengan suspensi yang mengandung konsentrasi FeCl₃ yang lebih rendah (5 g/L) karena kapasitas oksidasi yang lebih kuat dari FeCl₃, yang memiliki kandungan agen pengoksidasi Fe³⁺ yang lebih banyak. Penambahan senyawa organik, seperti molase, dilakukan untuk meningkatkan ekstraksi Pb serta mencegah pembentukan endapan PbSO₄ dan presipitasi ion ferik (Fe³⁺).

Dari kedua teknik bioleaching yang diterapkan serta penambahan NaCl, FeCl₃, dan molase, nilai ekstraksi Pb tertinggi yang dicapai adalah ~90.000 mg Pb terlarut per kg konsentrat galena. Hal ini tercapai melalui metode bioleaching langsung dengan parameter bioleaching berikut: persen padatan 2% w/v, FeCl₃ 5 g/L, NaCl 50 g/L, molase 20 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm pada suhu ruang (25 °C), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3a. Di sisi lain, ekstraksi Cu dan Zn sangat rendah, masing-masing hanya mencapai ~9.000 mg Cu terlarut per kg konsentrat galena (Gambar 3b) dan ~4.000 mg Zn terlarut per kg konsentrat galena (Gambar 3c). Demikian juga, hasil ekstraksi Pb (Gambar 3a) menunjukkan bahwa tingkat ekstraksi Pb pada leaching kontrol abiotik lebih rendah dibandingkan dengan bioleaching, yang mengindikasikan peran signifikan bakteri dalam proses bioleaching Pb. Hasil ekstraksi Pb (Gambar 3a) menunjukkan bahwa tingkat ekstraksi Pb pada leaching kontrol abiotik lebih rendah dibandingkan dengan bioleaching, mengindikasikan peran penting bakteri dalam proses bioleaching Pb.

Tabel 2a Selektivitas bioleaching timbal (Pb) oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) terhadap Cu (S_{Cu}) dan Zn (S_{Zn}) berdasarkan pengaruh variasi konsentrasi $FeCl_3$ dan NaCl serta metode bioleaching semi-langsung (*semi-direct bioleaching*) selama periode percobaan bioleaching 7 hari (Chaerun dkk., 2020).

Waktu (Hari)	Bioleaching semi-langsung (Variasi konsentrasi $FeCl_3$ + NaCl)							
	5+30 (g/L)		5+50 (g/L)		25+30 (g/L)		25+30 (g/L)	
	S_{Cu}	S_{Zn}	S_{Cu}	S_{Zn}	S_{Cu}	S_{Zn}	S_{Cu}	S_{Zn}
1	0,99	0,74	0,99	0,79	0,30	0,62	0,35	0,64
2	0,99	0,75	0,99	0,81	0,33	0,53	0,35	0,68
3	0,99	0,76	0,99	0,82	0,39	0,67	0,37	0,79
4	0,99	0,74	0,99	0,79	0,37	0,63	0,35	0,80
5	0,99	0,82	0,99	0,81	0,37	0,61	0,38	0,80
6	0,99	0,81	0,99	0,81	0,37	0,64	0,38	0,83
7	0,99	0,82	0,99	0,83	0,39	0,63	0,39	0,84

Tabel 2b Selektivitas bioleaching timbal (Pb) oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) terhadap Cu (S_{Cu}) dan Zn (S_{Zn}) berdasarkan pengaruh variasi konsentrasi molase serta metode bioleaching semi-langsung (*semi-direct bioleaching*) selama periode percobaan bioleaching 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).

Waktu (Hari)	Bioleaching semi-langsung (Variasi konsentrasi molase)					
	10 (g/L)		20 (g/L)		30 (g/L)	
	S_{Cu}	S_{Zn}	S_{Cu}	S_{Zn}	S_{Cu}	S_{Zn}
1	0,99	0,79	0,99	0,80	0,99	0,80
2	0,99	0,81	0,99	0,80	0,99	0,83
3	0,99	0,82	0,99	0,83	0,99	0,83
4	0,99	0,79	0,99	0,82	0,99	0,83
5	0,99	0,81	0,99	0,84	0,99	0,82
6	0,99	0,81	0,99	0,86	0,99	0,85
7	0,99	0,83	0,99	0,86	0,99	0,84

Untuk mengetahui perubahan komposisi mineral setelah proses bioleaching, residu hasil bioleaching dianalisis menggunakan XRD (X-ray Diffraction), dengan konsentrat galena awal dianalisis sebagai pembanding (Gambar 4). Gambar 4 menunjukkan pola difraksi sinar-X (XRD) dari konsentrat galena dan residunya setelah bioleaching semi-langsung dan bioleaching langsung selama 7 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua teknik bioleaching ini menyebabkan terbentuknya anglesit, yang menghambat peningkatan ekstraksi Pb dari konsentrat. Galena tetap menjadi mineral dominan dalam residu bioleaching, disertai dengan sejumlah kecil kalkopirit dan sfalerit. Berdasarkan spektra XRD, perubahan struktur mineralogi akibat bioleaching tidak tampak secara jelas. Oleh karena itu,

analisis Fourier Transform Infrared (FTIR) dilakukan untuk mengidentifikasi ikatan kimia dalam konsentrat galena sebelum dan sesudah bioleaching (Gambar 5).

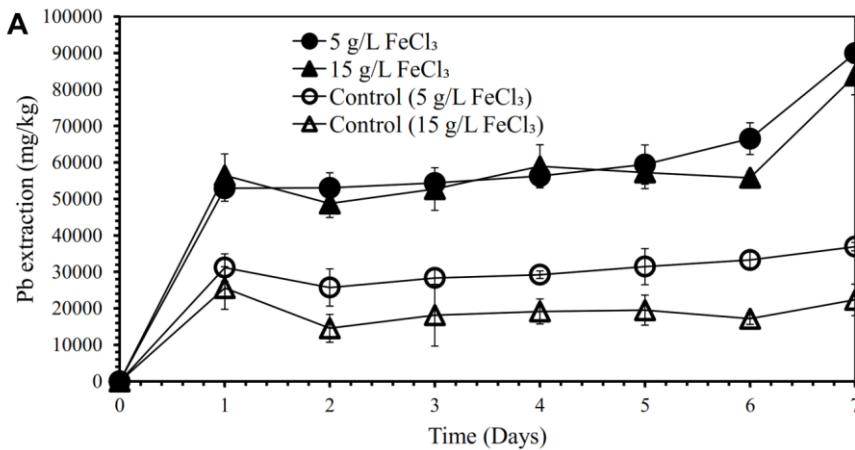
Tabel 2c Selektivitas bioleaching timbal (Pb) oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) terhadap Cu (S_{Cu}) dan Zn (S_{Zn}) berdasarkan pengaruh variasi konsentrasi $FeCl_3$ serta metode bioleaching langsung (direct bioleaching) selama periode percobaan bioleaching 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).

Waktu (Hari)	Bioleaching langsung (Variasi konsentrasi $FeCl_3$)			
	5 (g/L)		15 (g/L)	
	S_{Cu}	S_{Zn}	S_{Cu}	S_{Zn}
1	0,78	0,72	0,58	0,75
2	0,80	0,74	0,54	0,67
3	0,81	0,77	0,54	0,70
4	0,80	0,76	0,52	0,71
5	0,81	0,79	0,50	0,67
6	0,84	0,78	0,49	0,69
7	0,87	0,84	0,58	0,77

Spektrum FTIR dari konsentrat galena awal menunjukkan pita pada 400-800 cm^{-1} (mengindikasikan komponen anorganik seperti mineral dan lempung), 621 cm^{-1} (C-S *stretching*), 1000-1230 cm^{-1} (Si-O *stretching*), sekitar 1081 cm^{-1} (C-O *stretching* dari kelompok C-O-C, seperti pada selulosa), sekitar 1400 cm^{-1} (kelompok karboksilat dan karbonil), 1620-1640 cm^{-1} (kelompok C=O hidrofilik), dan 3000-3700 cm^{-1} (O-H *stretching*, ikatan hidrogen, dan kelompok OH). Spektrum ini menunjukkan bahwa pita pada 400-800 cm^{-1} , yang mencerminkan komponen anorganik seperti mineral termasuk galena, mengalami penurunan intensitas setelah proses bioleaching (baik semi-langsung maupun langsung), tetapi masih terlihat pada konsentrat galena awal sebelum bioleaching (Gambar 5). Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh aktivitas bakteri dalam proses bioleaching Pb dari konsentrat galena, yang juga didukung oleh adanya puncak tajam pada residu bioleaching pada 1385 cm^{-1} dan 1535-1660 cm^{-1} , sebagai indikator jelas keberadaan sel bakteri (Chaerun, dkk., 2013).

Selain itu, peningkatan intensitas pita lebar pada 3000-3600 cm^{-1} (ikatan hidrogen dan kelompok OH) dan dua puncak pada 2860 dan 2920 cm^{-1} (*asymmetric and symmetric C-H stretching vibrations of CH₃ and CH₂ groups*) diamati pada residu bioleaching. Hasil ini menunjukkan bahwa residu bioleaching mempertahankan lebih banyak air dan bahan organik hidrofobik

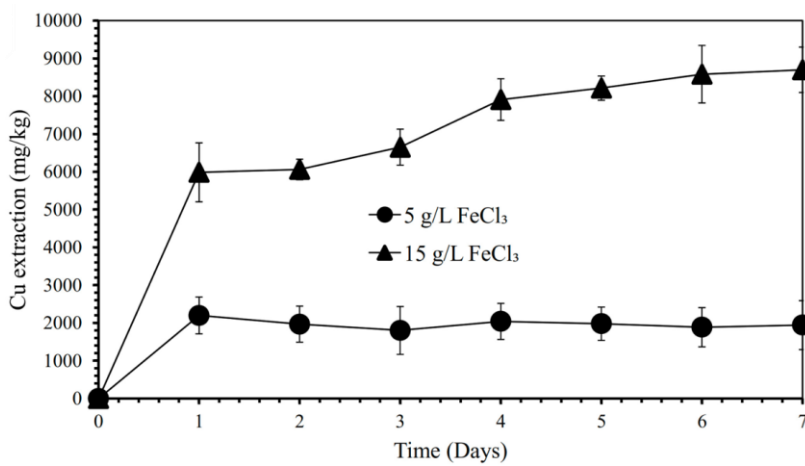
dibandingkan dengan konsentrat galena awal, yang berkaitan dengan keberadaan substansi polimer ekstraseluler (EPS) yang dihasilkan oleh bakteri. Analisis FTIR menunjukkan pembentukan EPS, yang mengindikasikan bahwa EPS tersebut terikat pada sel bakteri dan menyebabkan permukaan sel menjadi lebih hidrofobik. Sifat hidrofobik ini disebabkan oleh adanya senyawa seperti kelompok metil dan asetil yang terikat pada polisakarida (Flemming dan Wingender, 2010).



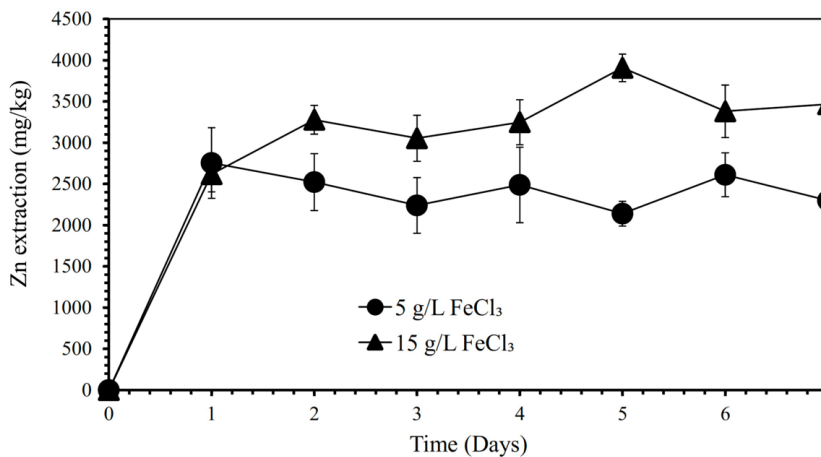
Gambar 3a Ekstraksi timbal (Pb) (mg Pb terlarut/kg konsentrat galena) dari konsentrat galena pada bioleaching langsung oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) serta kontrol abiotik bioleaching langsung (tanpa bakteri) dilakukan pada berbagai konsentrasi FeCl₃ (5 dan 15 g/L). Parameter bioleaching yang digunakan adalah inokulum bakteri 15% v/v, persen padatan 2% w/v, molase 20 g/L, NaCl 50 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm selama periode percobaan 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).

Pengamatan pemetaan SEM-EDS pada residu konsentrat galena (Gambar 6) mendukung hipotesis bahwa bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) menghasilkan EPS (*extracellular polymeric substances*), yang membentuk kompleks EPS-konsentrat dan berperan dalam degradasi antarmuka konsentrat galena serta bioleaching Pb dari konsentrat tersebut. Pembentukan agregat yang dihasilkan dari penempelan bakteri pada permukaan galena, akibat adanya EPS, dibuktikan dengan keberadaan unsur C dan N dalam residu yang merupakan komponen utama sel bakteri dan kandungan EPS (Gambar 6). Jumlah kecil Cu dan Zn yang terdeteksi melalui pemetaan SEM-EDS dalam penelitian ini juga membuktikan terjadinya bioleaching Pb, Cu, dan Zn, sebagaimana terlihat pada Gambar 3a-c. Analisis unsur dalam residu bioleaching (Tabel 3) menunjukkan peningkatan konsentrasi C, N, dan P, serta penurunan konsentrasi Pb, Cu, dan Zn

dibandingkan dengan konsentrat galena awal, yang mendukung hasil proses bioleaching tersebut.

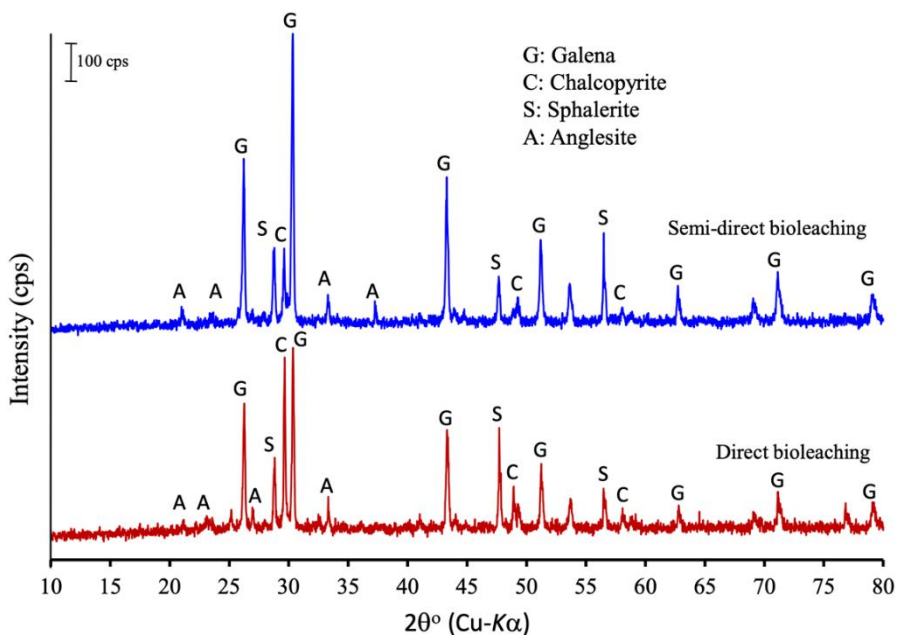


Gambar 3b Ekstraksi tembaga (Cu) (mg Cu terlarut/kg konsentrat galena) dari konsentrat galena pada bioleaching langsung oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) serta kontrol abiotik bioleaching langsung (tanpa bakteri) dilakukan pada berbagai konsentrasi FeCl₃ (5 dan 15 g/L). Parameter bioleaching yang digunakan adalah inokulum bakteri 15% v/v, persen padatan 2% w/v, molase 20 g/L, NaCl 50 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm selama periode percobaan 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).



Gambar 3c Ekstraksi seng (Zn) (mg Zn terlarut/kg konsentrat galena) dari konsentrat galena pada bioleaching langsung oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) serta kontrol abiotik bioleaching langsung (tanpa bakteri) dilakukan pada berbagai konsentrasi FeCl₃ (5 dan 15 g/L). Parameter bioleaching yang digunakan adalah inokulum bakteri 15% v/v, persen padatan 2% w/v, molase 20 g/L, NaCl 50 g/L, dan kecepatan rotasi 180 rpm selama periode percobaan 7 hari (Chaerun, dkk., 2020).

Hasil bioleaching mineral sulfida, yaitu konsentrat galena yang mengandung kalkopirit dan sfalerit pada suhu ruang dan tekanan atmosfer, menunjukkan bahwa bioleaching timbal terjadi secara selektif terhadap tembaga dan seng, serta mencegah pelepasan emisi SO₂ dan debu timbal (Pb). Berdasarkan hasil tersebut, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan kondisi bioleaching timbal yang optimal dengan terlebih dahulu mengadaptasi bakteri pada konsentrat galena sebelum digunakan dalam sistem bioleaching, mengingat penelitian yang dilakukan menggunakan bakteri yang belum diadaptasi dan menggunakan persen padatan yang rendah (2% b/v).

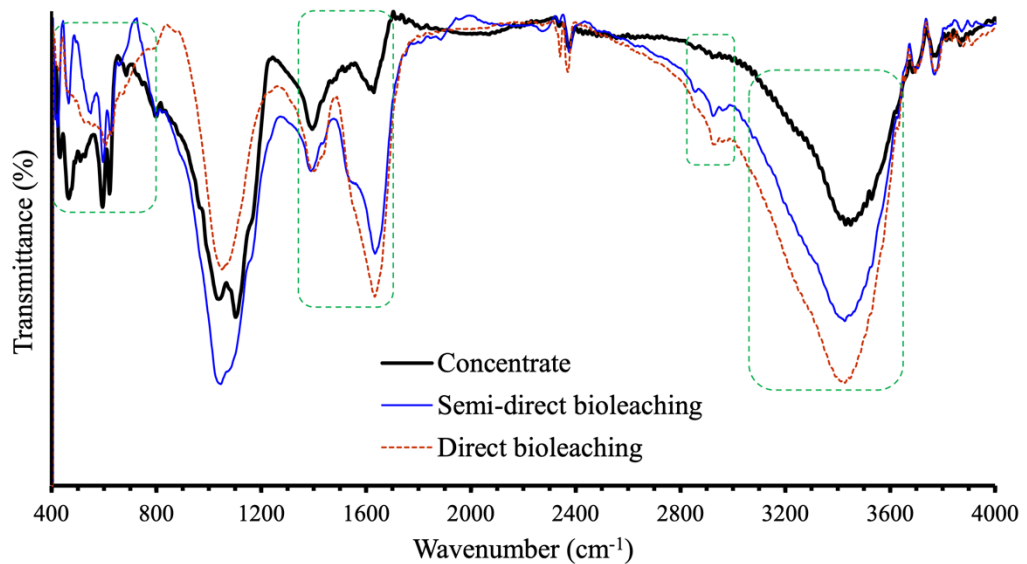


Gambar 4 Pola difraksi sinar-X dari residu konsentrat galena setelah proses bioleaching semi-langsung dan bioleaching langsung. Pada bioleaching semi-langsung, parameter yang digunakan adalah 5% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl₃, 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Sementara pada bioleaching langsung, parameter yang digunakan adalah 2% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl₃, 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Kedua proses menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) dan dilakukan selama 7 hari percobaan bioleaching (Chaerun, dkk., 2020).

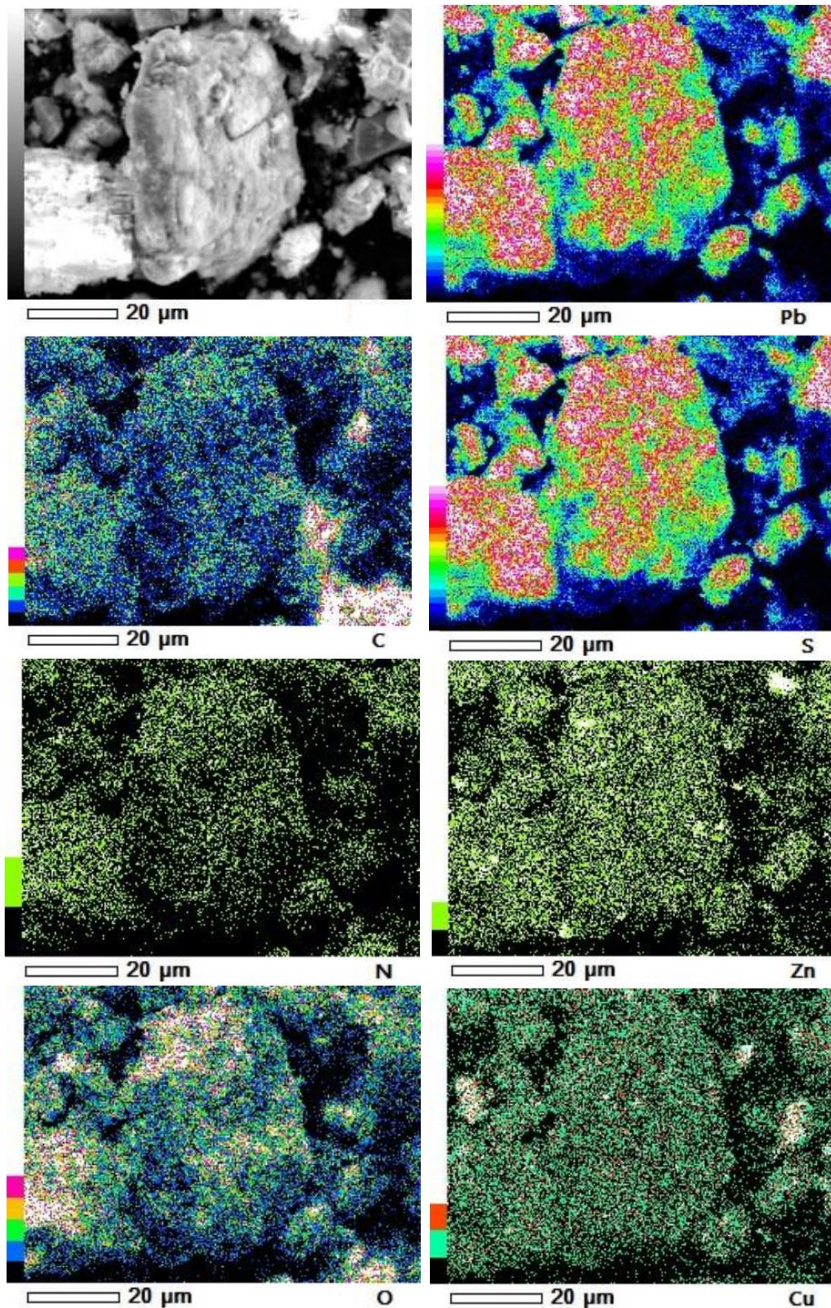
Dengan menggunakan bakteri yang telah diadaptasi, persen padatan yang lebih tinggi dapat diterapkan dalam proses bioleaching, dan toksisitas Pb pada persen padatan tinggi dapat dikurangi. Dibandingkan dengan teknologi peleburan yang saat ini digunakan untuk ekstraksi Pb dari galena (PbS), bioleaching (biohidrometalurgi) memiliki potensi untuk bersaing karena

keunggulannya dalam beberapa aspek: metode yang lebih ramah lingkungan, proses leaching yang lebih hemat energi, dan leaching selektif Pb terhadap Cu dan Zn. Selektivitas leaching Pb terhadap Cu dan Zn yang ditunjukkan dalam studi ini mempermudah ekstraksi Cu dan Zn pada tahap hilir (melalui jalur biohidrometalurgi atau hidrometalurgi) karena Pb telah dihilangkan sebelumnya.

Selain itu, bakteri *Citrobacter* sp. dalam penelitian ini terbukti mampu mengekstraksi Pb dari konsentrat galena dalam medium LB (Luria-Bertani) dengan konsentrasi NaCl yang tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian selanjutnya, penggunaan NaCl dapat digantikan dengan air laut, yang umum digunakan dalam industri pertambangan dan metalurgi, sementara tripton dapat digantikan dengan molase.



Gambar 5 Spektra Fourier transform infrared (FTIR) dari residu konsentrat galena setelah bioleaching semi-langsung dan bioleaching langsung. Pada bioleaching semi-langsung, parameter yang digunakan adalah 5% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl₃, 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Sedangkan pada bioleaching langsung, parameter yang digunakan meliputi 2% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl₃, 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase. Kedua metode bioleaching dilakukan menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) selama 7 hari percobaan (Chaerun dkk., 2020).



Gambar 6 Peta SEM-EDS menunjukkan komposisi unsur dari residu konsentrat galena pada bioleaching langsung, dengan parameter bioleaching berupa 2% b/v persen padatan, 5 g/L FeCl_3 , 50 g/L NaCl, dan 20 g/L molase, menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) setelah 7 hari percobaan bioleaching (Chaerun, dkk., 2020).

Tabel 3 Konsentrasi unsur ^(a) dari konsentrat galena setelah 7 hari bioleaching oleh bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur (*Citrobacter* sp.) dan konsentrat galena awal (Chaerun, dkk., 2020).

Unsur	Residu bioleaching (wt.%)	Konsentrat galena awal (wt.%)
Pb	7,18 (0,19) ~ 18,63 (0,09) ^b	38,26
Fe	3,15 (1,28)	8,73
S	11,99 (2,58)	8,00
Cu	1,34 (0,56)	5,55
Zn	n.d.	5,22
Si	0,03 (0) ~ 0,47 (0)	1,04
Al	0,28 (0,005)	0,365
Mg	0,04 (0,01)	0,157
Mn	n.d.	0,0826
Ca	0,03 (0)	0,0623
Cd	0,07 (0)	0,0540
K	-	0,0496
As	2,14 (0,43)	0,0370
U	n.d.	0,0208
Ga	n.d.	0,0186
Se	n.d.	0,0132
P	0,38 (0,02)	0,0116
Ti	0,04 (0)	0,0056
C	40,7 (1,3)	-
N	6,4 (0,5)	-
O	20,36 (3,28)	-

n.d.: not detected; "-": not measured; ^a Based on quantitative ED-XRF analyses (n = 2 - 4); ^b Standard deviation

Selanjutnya, proses bioleaching pada mineral oksida masih jarang digunakan, namun tetap memiliki potensi aplikasi, terutama pada bijih laterit yang mengandung nikel dan kobalt. Dalam konteks ini, mikroba berperan dalam memfasilitasi pelarutan oksida logam melalui jalur reduktif atau oksidatif, tergantung pada mineralogi dan kondisi lingkungan. Meskipun penerapan bioleaching pada mineral oksida masih berada dalam tahap penelitian dan pengembangan, teknik ini memiliki potensi untuk memperluas jenis bijih yang dapat diolah secara ekonomis menggunakan metode biomining.

Penggunaan proses bioleaching pada mineral oksida telah diterapkan pada terak feronikel menggunakan bakteri mixotrofik pengoksidasi besi dan sulfur, *Citrobacter freundii* (Chaerun, dkk., 2022a), serta pada bijih laterit (limonit dan saprolit) menggunakan fungi *Aspergillus niger* (Chaerun, dkk., 2017a). Pada penelitian bioleaching bijih laterit, dilakukan percobaan bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) terhadap bijih nikel limonit dan saprolit berkadar rendah menggunakan asam organik yang dihasilkan sebagai metabolit oleh fungi *Aspergillus niger*. Komposisi kimia bijih limonit dan saprolit yang digunakan dalam percobaan ini ditampilkan pada Tabel 4.

Percobaan bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) ini dilakukan dalam bejana kaca berleher lima berkapasitas 2000 ml yang berisi 500 ml filtrat kultur yang mengandung asam organik metabolit fungi (diperoleh dari percobaan biogenerasi asam organik setelah proses filtrasi), dengan penambahan bijih limonit atau saprolit. Dalam percobaan biogenerasi asam organik, produksi asam organik tertinggi oleh *A. niger* dicapai dengan menggunakan pati singkong sebagai sumber karbon, dalam kehadiran KH_2PO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, dan MgSO_4 di bawah kondisi aerasi, yang kemudian digunakan untuk percobaan bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*). Efisiensi bioleaching nikel tertinggi dari bijih saprolit dan limonit masing-masing adalah 88,9% dan 84,9%, yang dicapai pada suhu bioleaching 95 °C, kecepatan pengadukan 400 rpm, ukuran partikel bijih -177 + 149 μm , dan waktu pelindian 4 jam (untuk saprolit) dan 24 jam (untuk limonit) (Gambar 7 dan 8). Hal yang paling penting, bioleaching menggunakan asam organik hasil biogenerasi dalam penelitian tersebut menunjukkan selektivitas tinggi terhadap magnesium (Mg) dan selektivitas yang cukup baik terhadap besi (Fe) (Tabel 5a-b), sehingga memperkuat potensi aplikasinya dalam industri dengan mempertimbangkan aspek ekonomi dan lingkungan.

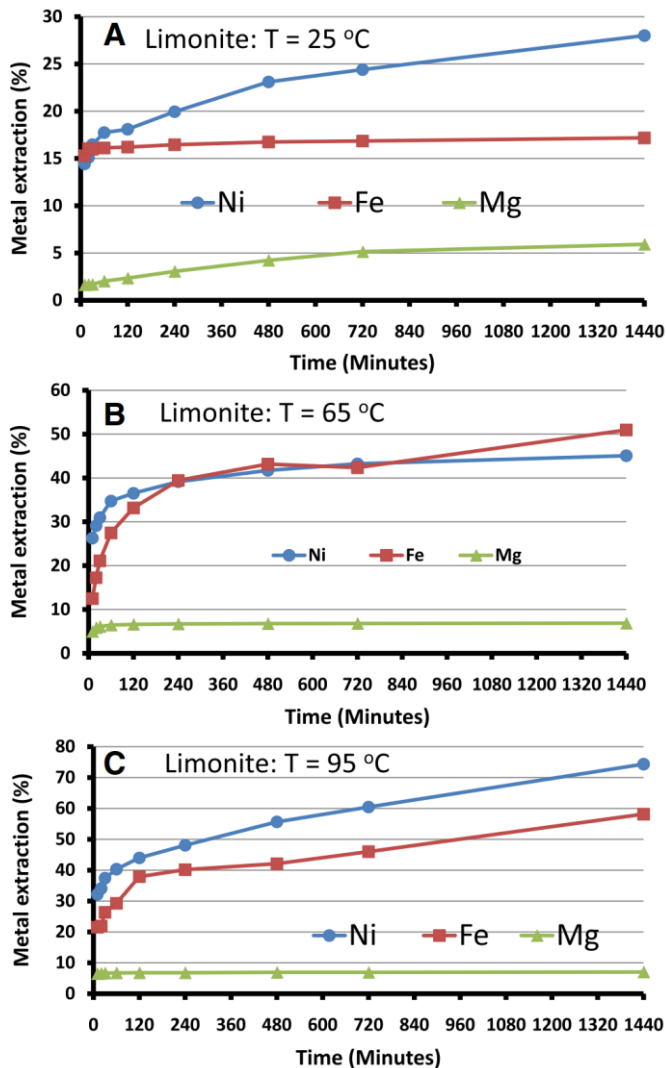
Secara keseluruhan, bioleaching merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk ekstraksi logam, yang sejalan dengan tujuan penambangan dan proses metalurgi yang berkelanjutan serta ramah lingkungan. Selain itu, potensi besar dan keuntungan dari penerapan teknik bioleaching pada mineral sulfida maupun oksida terletak pada tingginya selektivitas proses tersebut, yang dikenal sebagai *selective bioleaching*.

Tabel 4 Komposisi kimia bijih limonit dan saprolit yang digunakan dalam penelitian bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) menggunakan asam organik yang dihasilkan sebagai metabolit oleh fungi *Aspergillus niger* (Chaerun, dkk., 2017a).

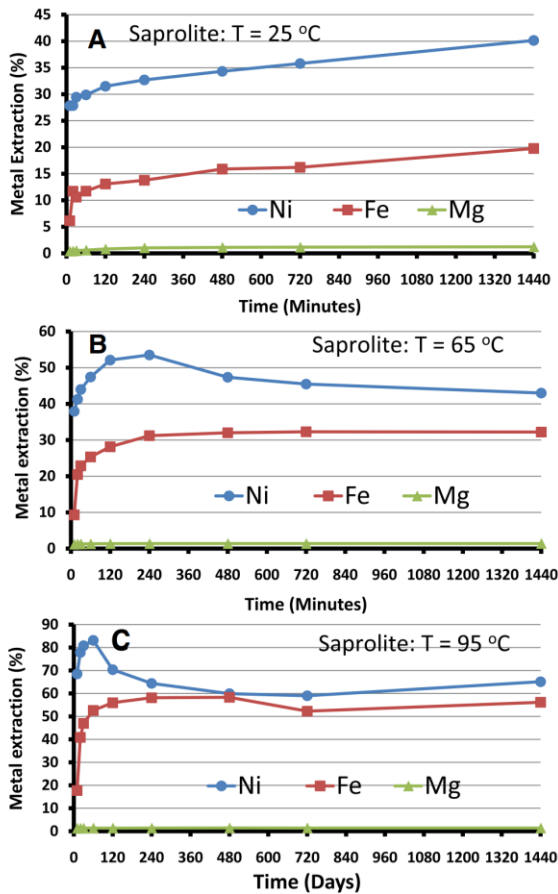
Komposisi Kimia	Limonit (Wt.%)	Saprolit (Wt.%)
SiO_2	27,59	39,74
Al_2O_3	4,08	1,6
TiO_2	0,09	0,027
Fe_2O_3	48,44	9,3
MnO	1,04	0,15
MgO	5,4	32,86
CaO	0,61	0,18
Na_2O	0,04	0,071
K_2O	0,024	0,007
P_2O_5	0,006	0,006
S	0,036	0,008
ZnO	0,053	0,005
NiO	1,98	2,02

Komposisi Kimia	Limonit (Wt.%)	Saprolit (Wt.%)
CuO	0,015	0,004
V ₂ O ₅	0,034	0,009
Cr ₂ O ₃	1,48	0,37
Co ₃ O ₄	0,155	0,02
Cl	0,019	0,03
I	0,013	n.d
Sc ₂ O ₃	0,006	n.d
LOI	11,38	13,56

n.d.: not detected



Gambar 7 Pengaruh suhu termasuk 25 °C (A), 65 °C (B), dan 95 °C (C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) (%) dalam bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) pada bijih limonit menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh *Aspergillus niger* sebagai fungsi waktu (Chaerun dkk., 2017a).



Gambar 8 Pengaruh suhu termasuk 25 °C (A), 65 °C (B), dan 95 °C (C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) (%) dalam bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) pada bijih saprolit menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh *Aspergillus niger* sebagai fungsi waktu (Chaerun, dkk., 2017a).

Tabel 5a Selektivitas bioleaching nikel oleh asam organik terhadap Fe (S_{Fe}) dan Mg (S_{Mg}) berdasarkan pengaruh variasi suhu (25 °C, 65 °C, dan 95 °C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) dalam bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) pada bijih limonit (Gambar 4) menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh *Aspergillus niger* selama periode percobaan 24 jam (Chaerun, dkk., 2017a).

Waktu (menit)	Limonit					
	T = 25 °C		T = 65 °C		T = 95 °C	
	S_{Fe}	S_{Mg}	S_{Fe}	S_{Mg}	S_{Fe}	S_{Mg}
10	0,49	0,90	0,68	0,84	0,60	0,83
20	0,48	0,90	0,63	0,83	0,61	0,84
30	0,51	0,91	0,59	0,83	0,59	0,85
60	0,52	0,90	0,56	0,84	0,58	0,86
120	0,53	0,89	0,52	0,85	0,54	0,87
240	0,55	0,87	0,50	0,85	0,54	0,88
480	0,58	0,85	0,49	0,86	0,57	0,89
720	0,59	0,83	0,51	0,86	0,57	0,90
1440	0,62	0,83	0,47	0,87	0,56	0,91

Tabel 5b Selektivitas bioleaching nikel oleh asam organik terhadap Fe (S_{Fe}) dan Mg (S_{Mg}) berdasarkan pengaruh variasi suhu (25 °C, 65 °C, dan 95 °C) terhadap ekstraksi logam (Ni, Fe, Mg) dalam bioleaching tidak langsung (*indirect bioleaching*) pada bijih saprolit (Gambar 5) menggunakan asam organik metabolit fungi yang dihasilkan oleh *Aspergillus niger* selama periode percobaan 24 jam (Chaerun, dkk., 2017a).

Waktu (menit)	Saprolit					
	T = 25 °C		T = 65 °C		T = 95 °C	
	S_{Fe}	S_{Mg}	S_{Fe}	S_{Mg}	S_{Fe}	S_{Mg}
10	0,82	0,99	0,80	0,97	0,79	0,981
20	0,70	0,98	0,67	0,97	0,66	0,983
30	0,74	0,98	0,66	0,97	0,63	0,983
60	0,72	0,98	0,65	0,97	0,61	0,984
120	0,71	0,97	0,65	0,97	0,56	0,981
240	0,70	0,97	0,63	0,98	0,53	0,979
480	0,68	0,97	0,60	0,97	0,51	0,977
720	0,69	0,97	0,58	0,97	0,53	0,977
1440	0,67	0,97	0,57	0,97	0,54	0,979

3 FITOMINING

Fitomining (*Phytomining*) adalah pendekatan inovatif dan berkelanjutan dalam pengolahan mineral di bidang metalurgi, yang memanfaatkan kemampuan alami tanaman hiperakumulator untuk mengekstraksi dan mengonsentrasikan logam dari tanah, berfungsi sebagai pengonsentrator dalam proses metalurgi. Tanaman-tanaman ini menyerap logam melalui akarnya dan mengonsentrasikannya dalam biomassa di bagian atas tanaman. Proses fitomining melibatkan penanaman tanaman ini di tanah yang kaya logam, diikuti dengan pemanenan biomassa, dan pemrosesan untuk mengekstraksi logam. Metode ini menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan praktik metalurgi konvensional, yang sering kali merusak lingkungan dan membutuhkan energi yang besar. Fitomining sangat berguna untuk mengekstraksi logam dari bijih berkadar rendah atau tanah yang terkontaminasi, yang tidak layak secara ekonomi untuk metode penambangan konvensional. Pengembangan teknologi fitomining sangat menjanjikan, terutama untuk ekstraksi logam tanah jarang (LTJ). Oleh karena itu, konsep fitomining yang berkelanjutan menjadi sangat penting dalam proses metalurgi, seperti yang diusulkan pada Gambar 9.

Dari Gambar 9, tahapan yang diusulkan dalam proses fitomining dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, lahan atau material yang paling cocok untuk teknik fitomining adalah bijih berkadar rendah, limbah metalurgi seperti tailings, dan lahan bekas tambang. Lahan bekas tambang dapat diolah seperti lahan pertanian dengan cara dibajak terlebih dahulu, sedangkan material berukuran besar harus direduksi ukurannya terlebih dahulu melalui proses peremukan (*crushing*) hingga mencapai ukuran partikel sekitar 2 mm. Setelah material atau lahan bekas tambang siap, teknik fitomining dapat diterapkan dengan menanam tanaman hiperakumulator yang sesuai dengan logam target yang ingin diambil atau diadsorpsi oleh tanaman tersebut.

Proses fitomining menghasilkan biomassa yang kaya akan logam target, sehingga berfungsi sebagai pengonsentrasi (*concentrator*) dalam metalurgi. Biomassa ini kemudian diproses lebih lanjut untuk memperoleh logam menggunakan teknik hidrometalurgi (*leaching*) atau biohidrometalurgi (*bioleaching*). Biomassa yang mengandung senyawa logam terkonsentrasi ini dikenal sebagai *bio-ores* atau bio-bijih. Sebelum dilakukan proses *leaching* atau

bioleaching, terdapat beberapa opsi untuk meningkatkan efisiensi proses, yaitu:

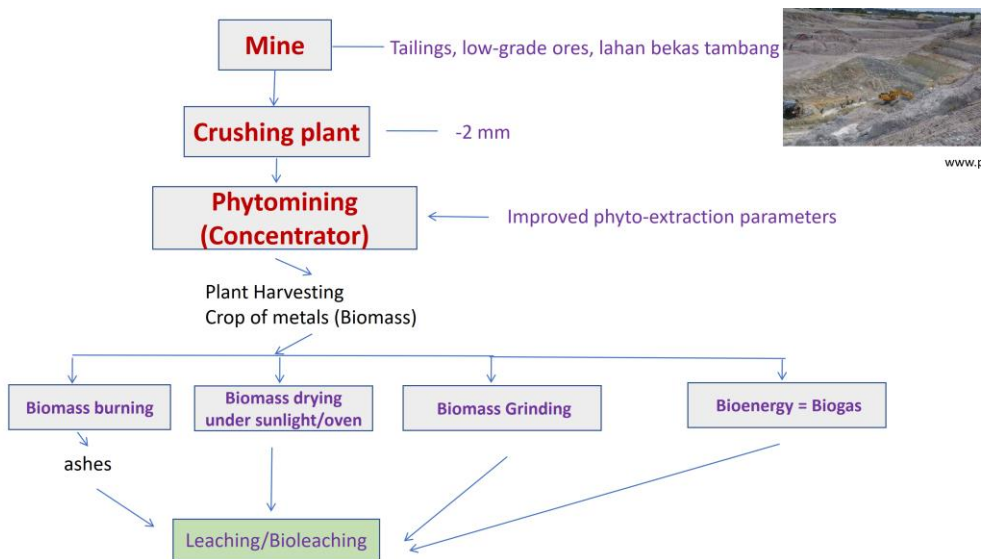
- Biomassa dibakar hingga menjadi abu, kemudian abu tersebut dilakukan *leaching* atau *bioleaching*.
- Biomassa dikeringkan terlebih dahulu di bawah sinar matahari atau dipanaskan dalam oven, kemudian biomassa kering tersebut dilakukan *leaching* atau *bioleaching*.
- Biomassa direduksi ukurannya melalui penggerusan (*grinding*), dan biomassa halus tersebut kemudian dilakukan *leaching* atau *bioleaching*.
- Biomassa difermentasi secara anaerobik untuk menghasilkan biogas (bioenergi), dan ampasnya kemudian dilakukan *leaching* atau *bioleaching*. Untuk opsi ini, dapat juga dilakukan sebaliknya, yaitu biomassa dilakukan *leaching* atau *bioleaching* terlebih dahulu, dan residu *leaching* atau *bioleaching* kemudian difermentasi secara anaerobik untuk menghasilkan biogas (bioenergi).

Proses fitomining terdiri dari beberapa tahapan. Pertama, tanaman ditanam di tanah yang mengandung logam target. Melalui sistem akar, tanaman ini menyerap ion logam dari tanah, sering kali dengan bantuan eksudat akar yang meningkatkan ketersediaan hayati logam tersebut. Setelah tanaman mencapai konsentrasi logam yang cukup tinggi, tanaman tersebut dipanen dan kemudian diproses untuk mengekstraksi logam melalui *bioleaching* atau *leaching*, yang dapat diawali dengan salah satu dari empat opsi yang telah disebutkan sebelumnya. Metode ini dapat diterapkan pada berbagai jenis logam, termasuk nikel, kobalt, logam mulia seperti emas, dan sangat sesuai untuk logam tanah jarang (LTJ).

Efektivitas tanaman dalam mengadsorpsi logam target dalam proses fitomining sangat dipengaruhi oleh jenis dan penggunaan agen pengkhelat. Agen pengkhelat merupakan senyawa organik yang dapat membentuk kompleks stabil dengan ion logam, sehingga meningkatkan kelarutan dan ketersediaan hayati logam tersebut untuk diserap oleh tanaman. Beberapa agen pengkhelat, seperti asam etilenediaminetetraasetat (EDTA), asam sitrat (CA), dan asam etilena diamina disuksinat (EDDS), telah diteliti karena kemampuannya dalam meningkatkan penyerapan logam oleh tanaman. EDTA dikenal sangat efektif dalam meningkatkan ketersediaan dan penyerapan logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan seng (Zn). Namun, penggunaannya dapat menimbulkan risiko lingkungan karena

sifatnya yang persisten dan potensi toksisitas terhadap mikroba tanah dan tanaman (Hosseinniaee, dkk., 2023).

Pemilihan agen pengkhelat dapat memengaruhi proses fitomining dengan mengubah sifat kimia dan fisik tanah, memengaruhi pertumbuhan tanaman, serta efisiensi penyerapan logam (Yin, dkk., 2024). Meskipun khelator sintetis seperti EDTA banyak digunakan, khelator alami sering kali lebih disukai karena dampak lingkungannya yang lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan agen pengkhelat yang tepat menjadi faktor krusial untuk mengoptimalkan penyerapan logam oleh tanaman dalam proses fitomining.



Gambar 9 Konsep fitomining yang diusulkan dalam proses metalurgi untuk mendukung praktik metalurgi yang berkelanjutan (Chaerun, unpublished).

Fitomining menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan teknik penambangan konvensional lainnya. Metode ini lebih ramah lingkungan karena tidak memerlukan penggalian atau penggunaan bahan kimia berbahaya. Selain itu, fitomining memiliki potensi untuk merehabilitasi tanah yang terkontaminasi, sehingga memungkinkan pemulihan ekosistem sambil secara bersamaan me-rekoveri logam berharga. Namun, fitomining juga menghadapi beberapa tantangan. Proses ini cenderung lebih lambat dibandingkan penambangan konvensional, dan keberhasilannya sangat bergantung pada faktor-faktor seperti spesies tanaman, kondisi tanah, dan

iklim. Selain itu, kelayakan ekonomi fitomining tergantung pada harga logam dan kemampuan untuk mengoptimalkan skala operasi secara efektif. Meskipun demikian, fitomining tetap merupakan langkah yang menjanjikan menuju metode ekstraksi mineral yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

4 URBAN BIOMINING

Urban biomining adalah pendekatan inovatif dalam pengelolaan limbah elektronik dan baterai, yang berfokus pada perolehan kembali logam berharga melalui proses bioteknologi. Metode ini merupakan bagian dari strategi urban mining yang lebih luas, yang bertujuan untuk mereklamasi sumber daya dari limbah yang dihasilkan di lingkungan perkotaan, seperti limbah elektronik (*e-waste*) dan baterai bekas. Urban biomining memanfaatkan kemampuan mikroba untuk mengekstraksi logam secara berkelanjutan, sehingga mengurangi ketergantungan pada metode konvensional yang sering kali merusak lingkungan dan membutuhkan energi dalam jumlah besar.

Dalam konteks *e-waste*, urban biomining melibatkan proses seperti *bioleaching*, di mana mikroba digunakan untuk melarutkan logam dari komponen elektronik. *E-waste*, yang mencakup perangkat seperti komputer dan ponsel yang dibuang, merupakan sumber yang kaya akan logam seperti emas, perak, tembaga, dan unsur tanah jarang atau logam tanah jarang (LTJ). *Bioleaching* menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional seperti pirometalurgi, yang dapat menghasilkan emisi berbahaya dan memerlukan *input* energi yang besar. Penggunaan mikroba dalam *bioleaching* dapat membantu *me-recovery* logam secara efisien sambil meminimalkan dampak lingkungan.

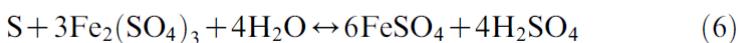
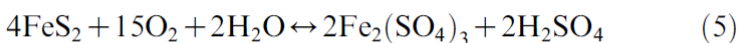
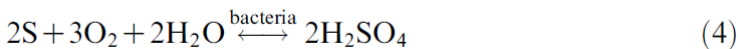
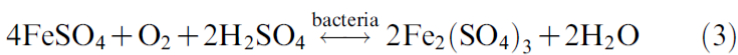
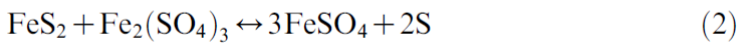
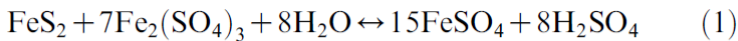
Limbah baterai, terutama dari baterai litium-ion, juga memberikan peluang besar untuk urban biomining. Baterai ini mengandung logam berharga seperti litium, kobalt, dan nikel, yang sangat penting untuk berbagai aplikasi teknologi. Melalui proses yang serupa dengan yang digunakan dalam biomining *e-waste*, mikroba dapat dimanfaatkan untuk mengekstraksi logam-logam ini dari baterai bekas (Satriadi, dkk., 2024). Pendekatan ini tidak hanya membantu dalam *me-recovery* sumber daya tetapi juga mengatasi bahaya lingkungan yang terkait dengan pembuangan baterai yang tidak tepat.

Meskipun urban biomining memiliki potensi yang menjanjikan, tantangan tetap ada, seperti mengoptimalkan efisiensi mikroba, memperbesar skala proses untuk aplikasi industri, dan mengintegrasikan metode ini ke dalam sistem pengelolaan limbah yang sudah ada. Namun demikian, urban biomining merupakan pendekatan yang visioner untuk *recovery* sumber daya dan pengelolaan limbah di masyarakat yang semakin urban.

5 BIOREMEDIASI AIR ASAM TAMBANG (AAT) DAN LIMBAH METALURGI

Bioremediasi air asam tambang (AAT) dan limbah metalurgi adalah strategi lingkungan yang esensial yang memanfaatkan organisme hidup, terutama mikroba dan tanaman, untuk mengurangi dampak merugikan dari polutan dari aktivitas pertambangan dan aktivitas metalurgi. AAT merupakan masalah lingkungan yang signifikan, dihasilkan dari oksidasi mineral sulfida yang terekspos selama aktivitas penambangan, yang menyebabkan air menjadi sangat asam serta kaya akan logam berat dan sulfat yang ditunjukkan pada persamaan reaksi kimia 6.

Efluen asam ini menimbulkan ancaman serius terhadap kehidupan akuatik, kesehatan tanah, dan kualitas air. Bioremediasi menawarkan pendekatan berkelanjutan untuk mengatasi AAT dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat (SRB), yang mengubah ion sulfat menjadi ion sulfida. Ion sulfida ini kemudian bereaksi dengan ion logam, mengendapkannya sebagai logam sulfida yang tidak larut, secara efektif menghilangkan logam toksik dari air.



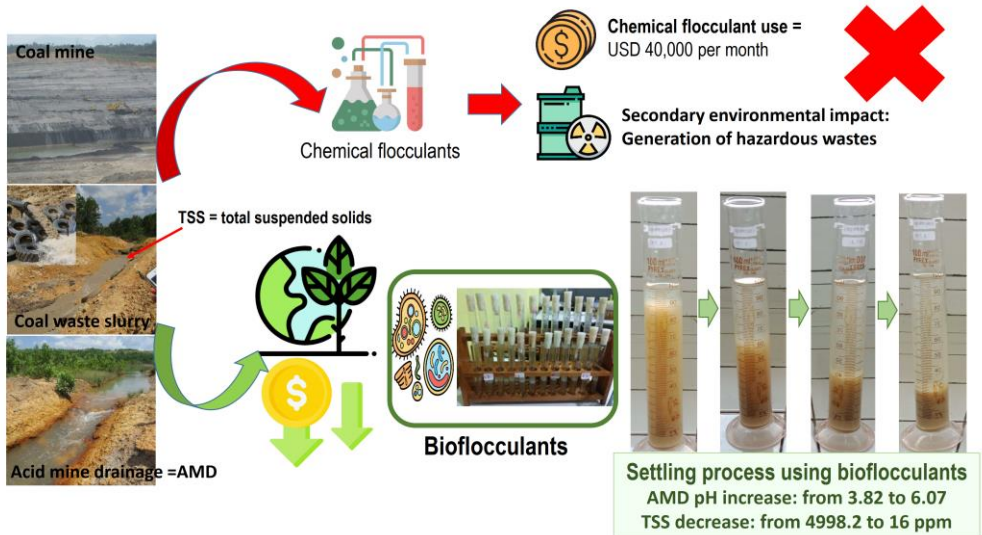
Bioremediasi AAT dapat diterapkan melalui sistem pengolahan aktif atau pasif. Sistem aktif, seperti bioreaktor, menyediakan lingkungan terkontrol yang memungkinkan aktivitas mikroba optimal, sehingga memungkinkan pengolahan yang lebih cepat dan efisien. Namun, sistem ini memerlukan investasi yang signifikan serta keahlian operasional yang memadai. Di sisi lain, sistem pasif, seperti lahan basah buatan, mengandalkan proses alami yang lebih hemat biaya, meskipun mungkin memerlukan lahan yang lebih luas dan waktu pengolahan yang lebih lama. Perkembangan terbaru dalam teknik bioremediasi telah mengeksplorasi penggunaan bahan baku terbarukan serta integrasi bioinformatika untuk meningkatkan efisiensi dan adaptabilitas mikroba.

Dalam konteks limbah metalurgi, bioremediasi dapat melibatkan penggunaan mikroba dan/atau tanaman untuk menstabilkan atau mengubah kontaminan logam menjadi bentuk yang kurang berbahaya. Dalam penggunaan mikroba, proses ini dapat mencakup biosorpsi, di mana sel mikroba menyerap ion logam pada permukaannya, serta bioakumulasi, di mana logam diambil dan dikonsentrasikan dalam sel mikroba. Adaptabilitas mikroba terhadap logam berat sangat penting, karena mereka dapat mengubah potensial redoks dan pH lingkungan sekitarnya, meningkatkan ketersediaan hayati serta imobilisasi logam.

Untuk penggunaan tanaman, bioremediasi limbah metalurgi yang dikenal dengan istilah fitoremediasi adalah pendekatan ramah lingkungan yang memanfaatkan kemampuan alami tanaman untuk mendetoksifikasi dan menstabilkan tanah yang tercemar. Metode ini sangat efektif untuk mengatasi kontaminasi logam berat dan polutan lain yang dihasilkan dari aktivitas metalurgi. Fitoremediasi bekerja melalui beberapa mekanisme, seperti fitoekstraksi, fitostabilisasi, dan rhizofiltrasi, yang masing-masing dirancang untuk menargetkan aspek spesifik dari kontaminasi logam. Keunggulan fitoremediasi antara lain biaya yang rendah, minimnya gangguan terhadap lingkungan, serta kemampuannya dalam memperbaiki kesehatan dan kesuburan tanah. Namun demikian, keberhasilan fitoremediasi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk pemilihan spesies tanaman yang tepat, kondisi tanah, serta jenis dan konsentrasi kontaminan. Walaupun fitoremediasi merupakan teknologi yang menjanjikan dalam bioremediasi limbah metalurgi, proses ini membutuhkan perencanaan dan pengelolaan yang matang untuk mengoptimalkan efektivitasnya dan memastikan

keberlanjutan jangka panjang. Bioremediasi limbah metalurgi tidak hanya mengurangi risiko lingkungan, tetapi juga menawarkan potensi *recovery* dan daur ulang logam, yang berkontribusi pada praktik pengelolaan limbah metalurgi yang lebih berkelanjutan.

Dalam perkembangan bioremediasi AAT menggunakan mikroba, telah dikembangkan pula mikroba yang berfungsi sebagai bioflokulan (Chaerun dkk., 2023a). Pengembangan ini didorong oleh adanya TSS (*total suspended solids*) dalam AAT, sehingga bakteri yang digunakan untuk bioremediasi AAT juga harus memiliki kemampuan sebagai agen flokulan. Proses bagaimana bakteri bioflokulan dapat berperan ganda dalam menurunkan TSS dan meremediasi AAT ditunjukkan dalam skema ilustrasi pada Gambar 10.



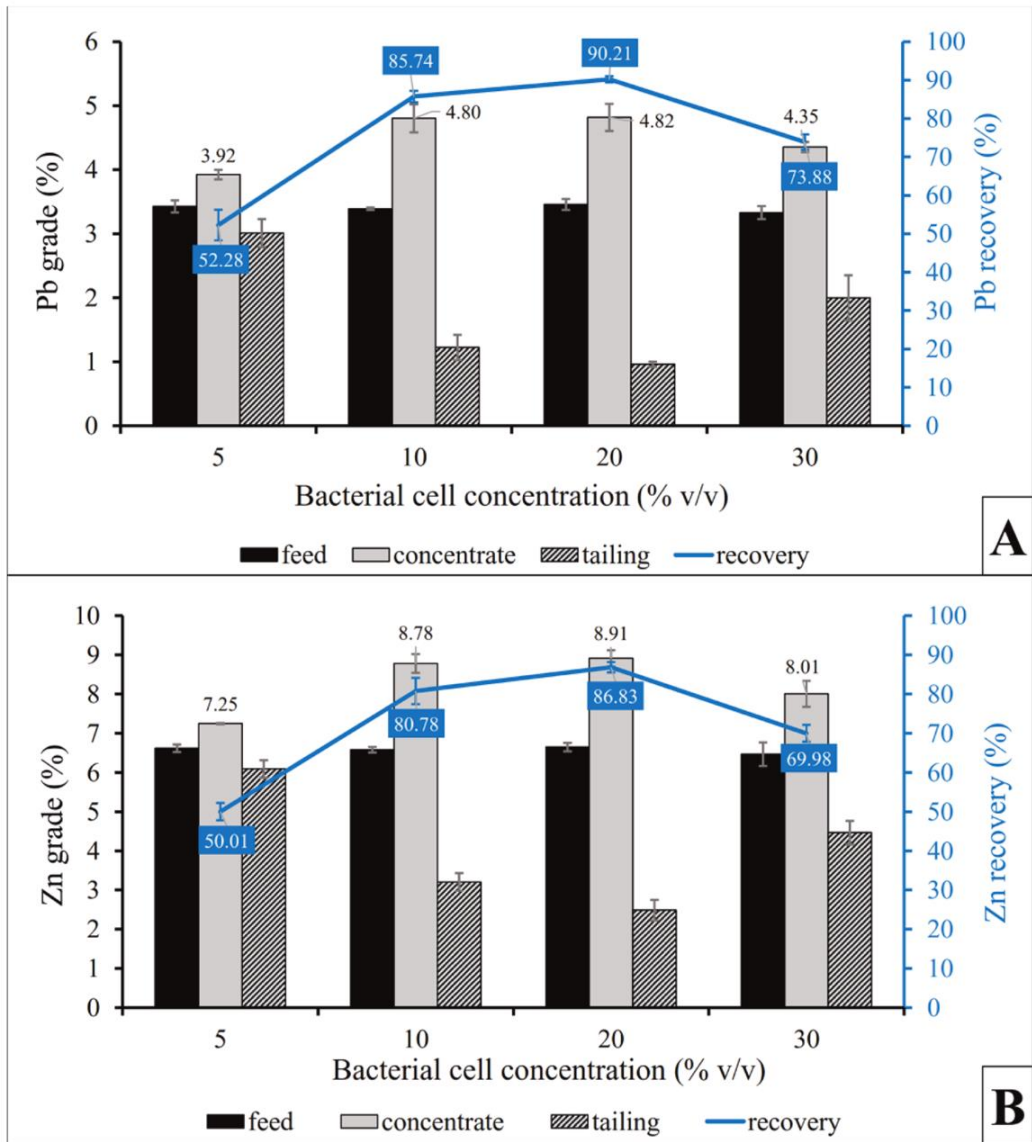
Gambar 10 Skema ilustrasi yang menunjukkan bakteri bioflokulan dapat berperan ganda dalam menurunkan TSS dan meremediasi AAT (Chaerun, dkk., 2023a).

6 BIOFLOTASI

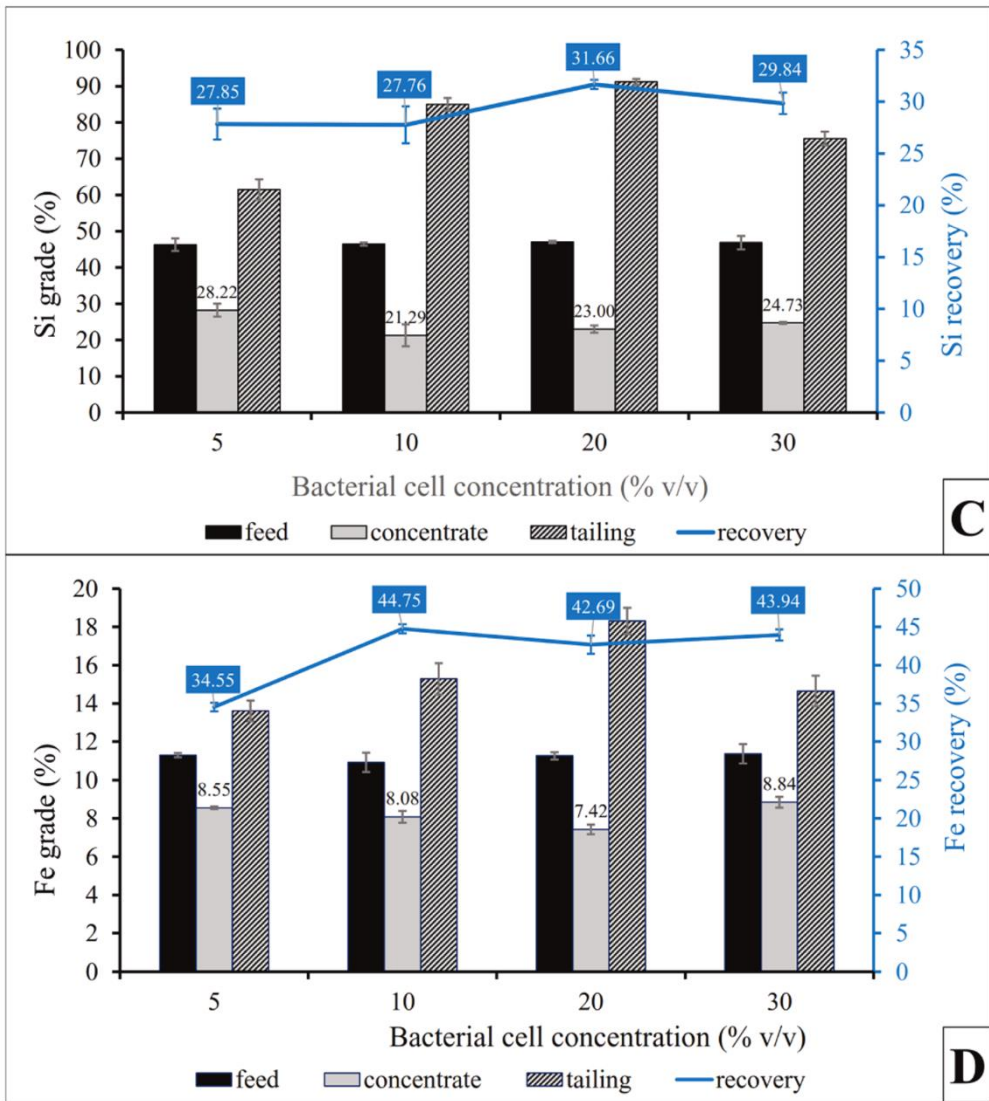
Bioflotasi adalah teknik inovatif dan ramah lingkungan yang digunakan dalam metalurgi untuk pemrosesan mineral. Proses ini melibatkan penggunaan mikroba atau produk metabolit mereka sebagai reagen untuk memodifikasi sifat permukaan mineral, sehingga memudahkan pemisahannya. Berbeda dengan metode flotasi konvensional yang mengandalkan reagen kimia, bioflotasi memanfaatkan entitas biologi untuk mencapai selektivitas dan efisiensi dalam pemrosesan mineral. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan penggunaan bahan kimia, tetapi juga menawarkan alternatif berkelanjutan untuk pemrosesan mineral.

Mekanisme bioflotasi didasarkan pada interaksi antara mikroba dan permukaan mineral. Mikroba, seperti bakteri, menghasilkan zat polimer ekstraseluler (EPS) yang dapat mengubah sifat hidrofobik permukaan mineral. Perubahan sifat permukaan ini meningkatkan keterikatan selektif gelembung udara pada partikel mineral yang diinginkan, sehingga memungkinkan pemisahan dari partikel yang tidak diinginkan. Sebagai contoh, penggunaan mikroba, terutama bakteri dan metabolitnya, telah berhasil diterapkan sebagai reagen bioflotasi menggunakan sel flotasi skala laboratorium (Sanwani, dkk., 2021, 2021a). Bakteri dan metabolitnya sebagai reagen bioflotasi telah terbukti mampu secara selektif mengapungkan galena dan sfalerit dari bijih Pb-Zn kompleks, yang menunjukkan potensi bakteri dan metabolitnya dalam pemrosesan mineral. Dalam penelitian skala laboratorium menggunakan sel flotasi Denver, pengaruh pH, konsentrasi bioreagen, dan waktu kondisioning terhadap kadar dan rekovery mineral diamati (Sanwani, dkk., 2021). Hasilnya menunjukkan bahwa bakteri *Alicyclobacillus* sp. mampu berfungsi sebagai bioreagen (kolektor) dalam proses flotasi untuk memisahkan galena dan sfalerit pada kondisi pH rendah (pH 3). Bakteri ini memiliki tingkat *recovery* yang tinggi terhadap Pb (90,21%) dan Zn (86,83%), dengan kadar masing-masing sebesar 4,82% (Pb) dan 8,91% (Zn) (Gambar 11a). Sementara itu, *recovery* untuk Si dan Fe hanya mencapai masing-masing sebesar 31,66% dan 42,69% (Gambar 11b). Selain itu, kinerja bioflotasi yang tinggi dengan menggunakan bakteri ini dicapai pada waktu kondisioning sekitar 1 jam dengan konsentrasi sel bakteri 20% v/v. Meskipun hasil ini lebih rendah dibandingkan dengan kolektor yang digunakan di industri (berdasarkan kinerja flotasi menggunakan reagen flotasi

konvensional), bakteri ini memiliki potensi untuk digunakan di masa depan sebagai reagen flotasi alternatif yang ramah lingkungan untuk flotasi selektif mineral sulfida yang lebih berkelanjutan secara ekologis.



Gambar 11a Recovery dan kadar (%) Pb dan Zn dalam bioflotasi bijih kompleks Pb-Zn menggunakan *Alicyclobacillus* sp. sebagai bioreagen flotasi pada berbagai konsentrasi sel bakteri. A: untuk Pb dan B: untuk Zn (Sanwani dkk., 2021).



Gambar 11b Recovery dan kadar (%) Si dan Fe dalam bioflotasi bijih kompleks Pb-Zn menggunakan *Alicyclobacillus* sp. sebagai bioreagen flotasi pada berbagai konsentrasi sel bakteri. C: untuk Si dan D: untuk Fe (Sanwani dkk., 2021).

Selanjutnya, bioflotasi sangat menguntungkan untuk pemrosesan partikel halus dan bijih kompleks yang sulit diolah dengan metode tradisional. Adaptabilitas mikroba terhadap berbagai sistem mineral dan kemampuannya berfungsi dalam kondisi yang ringan menjadikan bioflotasi sebagai teknik yang menjanjikan untuk masa depan pemrosesan mineral. Namun, efektivitas bioflotasi bergantung pada berbagai faktor, termasuk jenis mikroba yang digunakan, komposisi mineral, dan kondisi operasional. Penelitian yang

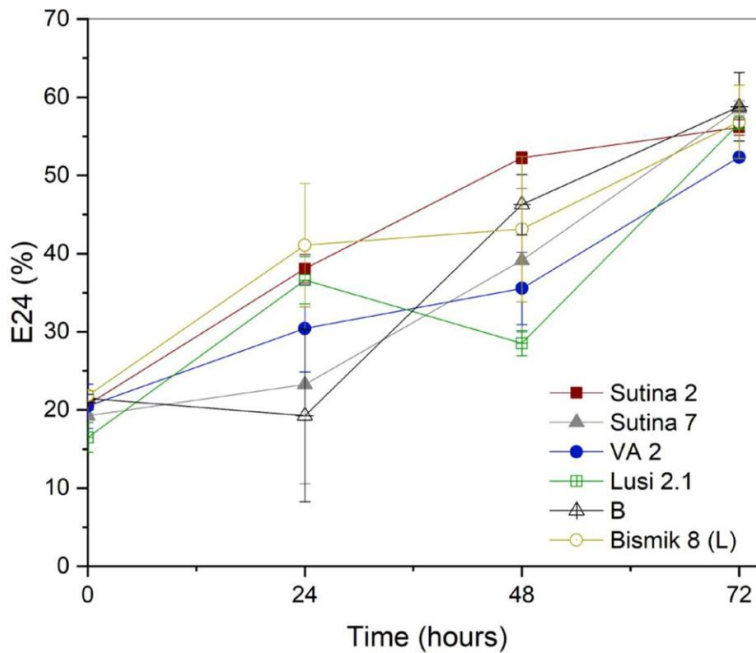
sedang berlangsung saat ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter-parameter ini dan mengeksplorasi manipulasi genetik mikroba untuk meningkatkan kemampuan flotasinya. Seiring dengan meningkatnya permintaan akan praktik penambangan yang lebih bersih dan berkelanjutan, bioflotasi menawarkan solusi yang layak untuk memenuhi kebutuhan ini sambil tetap mempertahankan kelayakan ekonomi.

7 BIOFLOKULASI

Bioflokulasi adalah proses dalam metalurgi yang memanfaatkan bakteri untuk mengumpulkan dan mengendapkan partikel tersuspensi, termasuk partikel mineral halus, dalam larutan. Metode ini semakin menarik perhatian sebagai alternatif ramah lingkungan dibandingkan dengan flokulan kimia konvensional, yang dapat menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Bakteri yang terlibat dalam bioflokulasi menghasilkan zat polimer ekstraseluler (EPS), seperti polisakarida, protein, dan asam nukleat, yang memfasilitasi agregasi partikel menjadi flok yang lebih besar dan mudah dipisahkan dari fase cair (Jeremy dkk., 2024; Sanwani, dkk., 2022).

Dalam konteks metalurgi, bioflokulasi sangat bermanfaat untuk pengolahan bijih dan pengolahan air limbah penambangan/metalurgi. Bakteri seperti spesies *Bacillus*, *Rhodococcus*, dan *Pseudomonas* telah diidentifikasi sebagai penghasil bioflokulan yang efektif. Mikroba ini dapat memodifikasi sifat permukaan partikel mineral, meningkatkan agregasi, dan mempermudah pemisahannya dengan cara sedimentasi (Jeremy, dkk., 2024). Sebagai contoh, bioflokulan dari bakteri telah berhasil diterapkan untuk meningkatkan pemisahan besi dari *red mud* melalui bioflokulasi selektif (Sanwani dkk., 2022). Bakteri dapat berfungsi sebagai bioflokulan, yang ditandai dengan nilai indeks pengemulsinya (E24 = Emulsification Index) yang diamati seiring dengan pertumbuhan bakteri tersebut (Gambar 12).

Keuntungan penggunaan bioflokulasi dalam metalurgi mencakup keberlanjutan dan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan flokulan kimia. Bioflokulan bersifat *biodegradable* dan tidak toksik, sehingga lebih aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Selain itu, produksi bioflokulan dapat menjadi lebih ekonomis, terutama jika menggunakan bahan limbah atau sumber daya terbarukan sebagai substrat untuk pertumbuhan bakteri (Sanwani, dkk., 2022). Namun demikian, masih ada tantangan dalam mengoptimalkan produksi dan aplikasi bioflokulan, termasuk kebutuhan akan metode produksi skala besar dan pengembangan strain dengan efisiensi flokulasi yang lebih tinggi. Meski demikian, bioflokulasi merupakan pendekatan yang menjanjikan dalam mencapai proses metalurgi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.



Gambar 12 Indeks pengemulsian (E24) dari enam strain bakteri yang dipilih untuk uji pengendapan. *Bacillus velezensis* strain SKC/S-2 (dengan kode sutina 2) dan *Paenibacillus pasadenensis* strain SKC/S-7 (dengan kode sutina 7) dari batch 1; *Bacillus zanthoxyli* strain SKC/VA-2 (dengan kode VA2) dan *Bacillus nitratireducens* strain SKC/L-2 (dengan kode Lusi 2.1) dari batch 2; serta *Bacillus aryabhatai* strain SKC-5 (dengan kode B) dan *Serratia rubiddea* strain SKC-11 (dengan kode Bismik 8 (L)) dari batch 3 (Sanwani, dkk., 2022).

8 BIOMINERALISASI

Biom mineralisasi, khususnya Presipitasi Kalsium Karbonat yang Diinduksi Secara Mikrobiologi (MICCP: *Microbiologically Induced Calcium Carbonate Precipitation*), merupakan proses menarik di mana mikroba menginduksi pembentukan mineral, terutama kalsium karbonat, dalam lingkungannya. Proses ini adalah bagian dari biom mineralisasi, yang secara umum merujuk pada cara organisme menghasilkan mineral untuk memperkuat atau mengeraskan jaringan. MICCP memiliki signifikansi khusus dalam rekayasa lingkungan dan remediasi, di mana proses ini menawarkan solusi berkelanjutan untuk berbagai tantangan.

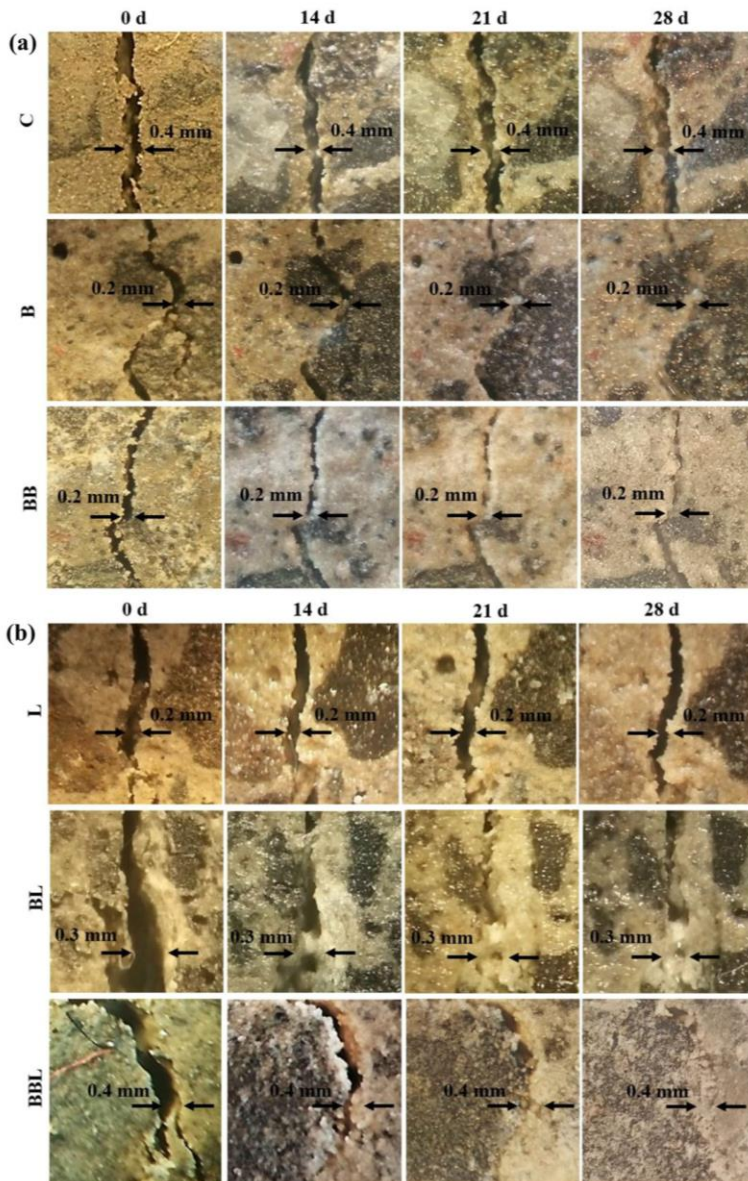
MICCP melibatkan beberapa jalur biokimia yang didorong oleh aktivitas metabolisme mikroba. Mekanisme yang paling umum adalah hidrolisis urea, di mana bakteri ureolitik seperti *Sporosarcina pasteurii* menghidrolisis urea menjadi amonia dan karbonat. Reaksi ini meningkatkan pH lingkungan, memfasilitasi presipitasi kalsium karbonat dalam bentuk kalsit, aragonit, atau vaterit, tergantung pada kondisi yang ada (Chaerun, dkk., 2020c; Chaerun, dkk., 2020d; Syarif, dkk., 2024; Syarif, dkk., 2024a; Syarif, dkk., 2019). Jalur lainnya meliputi denitrifikasi, reduksi sulfat, dan reduksi besi, yang masing-masing melibatkan komunitas mikroba dan reaksi kimia yang berbeda. Proses-proses ini tidak hanya menghasilkan pembentukan kalsium karbonat tetapi juga berkontribusi pada penyerapan karbon dioksida, yang dapat mendukung upaya menuju netralitas karbon.

Mikroba yang menghasilkan enzim karbonat anhidrase (CA) memiliki peran krusial dalam pembentukan kalsium karbonat melalui penyerapan karbon dioksida (CO_2). Enzim CA mengkatalisis proses hidrasi reversibel CO_2 menjadi ion bikarbonat, yang selanjutnya terdisosiasi menjadi ion karbonat dalam kondisi alkalin. Ion kalsium yang ada akan bereaksi dengan ion karbonat untuk membentuk kalsium karbonat (CaCO_3), sehingga CO_2 dapat diserap dalam bentuk mineral yang stabil, berkontribusi pada pengurangan emisi CO_2 . Pendekatan biomimetik ini memanfaatkan efisiensi katalitik CA untuk meningkatkan laju dan efektivitas sekuestrasi CO_2 , sehingga menjadi solusi potensial untuk menurunkan kadar CO_2 di atmosfer. Dengan mengonversi CO_2 menjadi karbonat padat, karbonat anhidrase tidak hanya berperan sebagai agen penyerapan karbon, tetapi juga mendukung

pengembangan material berkelanjutan, seperti produk semen negatif karbon, yang sesuai dengan upaya global dalam mengatasi perubahan iklim.

Selanjutnya, MICCP memiliki berbagai aplikasi, terutama dalam remediasi lingkungan dan konstruksi. Proses ini digunakan untuk memperbaiki sifat tanah, seperti meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi permeabilitas, yang bermanfaat dalam mencegah likuifaksi tanah dan erosi. Dalam bidang konstruksi, MICCP diterapkan untuk meningkatkan ketahanan struktur beton melalui mekanisme penyembuhan diri (*self-healing*) pada retakan, sehingga memperpanjang umur struktur dan mengurangi biaya pemeliharaan. Proses *self-healing* ini ditunjukkan pada Gambar 13, di mana strain *Lysinibacillus sphaericus* SKC/VA-1, yang dikombinasikan dengan kalsium laktat pentahidrat sebagai sumber kalsium berbiaya rendah dalam penelitian ini, menunjukkan kemampuan penyembuhan sendiri pada mortar, baik dengan maupun tanpa kehadiran bakteri atau kalsium laktat pentahidrat (selanjutnya disebut kalsium laktat). Proses penyembuhan sendiri berlangsung selama 28 hari pada spesimen yang mengandung bakteri dengan dan tanpa kalsium laktat (B, BL, BB, BBL), tetapi tidak terjadi pada spesimen C (tanpa bakteri dan kalsium laktat) serta L (mengandung kalsium laktat tetapi tanpa bakteri). Spesimen dengan konsentrasi sel bakteri yang lebih tinggi (BB dan BBL) menunjukkan pertumbuhan kristal yang lebih cepat pada dinding retakan. Sementara itu, spesimen yang mengandung bakteri dan kalsium laktat (BL dan BBL) menghasilkan lebih banyak endapan dibandingkan spesimen lainnya.

Selain itu, MICCP dapat digunakan untuk mengimobilisasi logam berat dan radionuklida dalam tanah yang terkontaminasi, secara efektif mengurangi mobilitas dan ketersediaannya bagi organisme hidup. Proses ini ramah lingkungan karena memanfaatkan aktivitas mikroba alami dan mengurangi kebutuhan bahan kimia tambahan. Namun, tantangan tetap ada dalam meningkatkan skala MICCP untuk aplikasi yang lebih luas, karena faktor lingkungan dapat sangat memengaruhi aktivitas dan efisiensi mikroba. Penelitian terus dilakukan untuk mengoptimalkan kondisi dan strain mikroba guna meningkatkan ketahanan dan aplikasi MICCP di berbagai bidang.



Gambar 13 Gambar stereomikroskopik dari proses penyembuhan sendiri selama 28 hari pada retakan buatan spesimen mortar (dari uji Brasil) tanpa (a) dan dengan (b) kalsium laktat pentahidrat. Kehadiran kalsium laktat pentahidrat terlihat sedikit mempengaruhi presipitasi kalsit. Bakteri yang dikombinasikan dengan kalsium laktat pentahidrat menunjukkan pertumbuhan kristal yang signifikan pada retakan buatan tersebut, yang menunjukkan adanya proses penyembuhan sendiri.

9 BIONANOMETALURGI

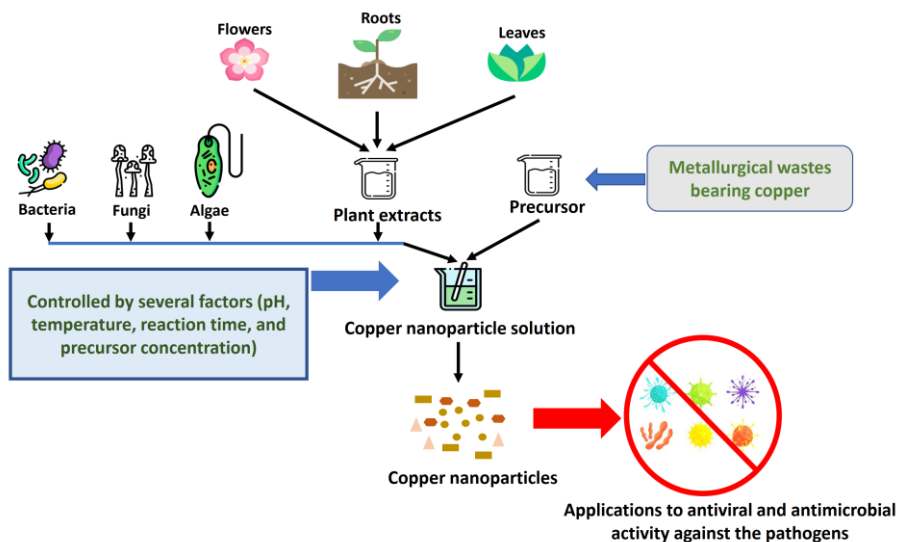
Bionanometalurgi adalah bidang inovatif yang memadukan prinsip-prinsip bioteknologi dan nanoteknologi untuk mensintesis nanopartikel logam dengan menggunakan entitas biologi seperti mikroba dan tumbuhan sebagai agen pereduksi. Pendekatan ini memanfaatkan kemampuan alami organisme tersebut untuk mengonversi ion logam menjadi nanopartikel, menawarkan alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan dibandingkan dengan metode sintesis nanopartikel konvensional yang berbasis kimia dan fisika. Penggunaan sistem biologi dalam proses ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga meningkatkan biokompatibilitas dan fungsionalitas nanopartikel yang dihasilkan (Chaerun, dkk., 2022).

Mikroorganisme, termasuk bakteri, jamur, dan alga, berperan penting dalam biosintesis nanopartikel. Mereka memiliki kemampuan untuk menyerap ion logam dari lingkungan dan mereduksinya menjadi bentuk elemental melalui proses enzimatik. Misalnya, bakteri seperti *Pseudomonas fluorescens* dan *Escherichia coli* telah digunakan untuk mensintesis nanopartikel perak, sementara *Bacillus subtilis* dikenal untuk menghasilkan nanopartikel titanium dioksida (Chaerun, dkk., 2022). Mikroba ini mengeluarkan enzim dan metabolit yang memfasilitasi reduksi ion logam serta menstabilkan nanopartikel yang dihasilkan, sering kali melalui pembentukan lapisan pelindung yang mencegah agregasi dan meningkatkan stabilitas. Metode biogenik ini menawarkan keuntungan berupa biaya yang rendah, skalabilitas, serta kemampuan untuk menghasilkan nanopartikel dengan bentuk dan ukuran yang beragam sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu.

Tumbuhan juga digunakan sebagai agen pereduksi dalam bionanometalurgi, memanfaatkan fitokimia yang dikandungnya untuk mengonversi ion logam menjadi nanopartikel. Ekstrak tumbuhan mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti flavonoid, alkaloid, dan terpenoid, yang berfungsi sebagai agen pereduksi sekaligus penstabil selama sintesis nanopartikel (Chaerun, dkk., 2022). Metode ini sering disebut sebagai "sintesis hijau" karena dampaknya yang minimal terhadap lingkungan serta penggunaan sumber daya yang dapat diperbarui. Sebagai contoh, ekstrak tumbuhan telah digunakan untuk mensintesis nanopartikel emas dan perak yang memiliki sifat optik, listrik, dan antimikroba yang unik, yang berguna

dalam berbagai aplikasi termasuk di bidang medis dan elektronik. Sintesis berbasis tumbuhan ini sangat menarik karena kesederhanaannya, biaya yang rendah, serta potensi untuk produksi skala besar tanpa memerlukan bahan kimia berbahaya.

Proses sintesis nanopartikel menggunakan mikroba dan tumbuhan, seperti yang diterapkan pada sintesis nanopartikel tembaga (CuNPs), ditunjukkan pada Gambar 14. Secara keseluruhan, bionanometalurgi yang memanfaatkan mikroba dan tumbuhan sebagai agen pereduksi menawarkan jalur yang menjanjikan untuk produksi nanopartikel yang berkelanjutan. Pendekatan ini sejalan dengan meningkatnya permintaan akan teknologi hijau dan menyediakan platform untuk pengembangan material baru dengan aplikasi di berbagai bidang, termasuk medis, remediasi lingkungan, dan elektronik. Namun, tantangan seperti pengoptimalan kondisi reaksi dan pencapaian keseragaman dalam ukuran dan bentuk nanopartikel perlu diatasi untuk sepenuhnya mewujudkan potensi teknologi ini pada skala industri.



Gambar 14 Proses sintesis nanopartikel tembaga (CuNPs) menggunakan mikroba dan tumbuhan, serta parameter-parameter yang memengaruhi sintesis tersebut dan aplikasinya (Chaerun, dkk., 2022).

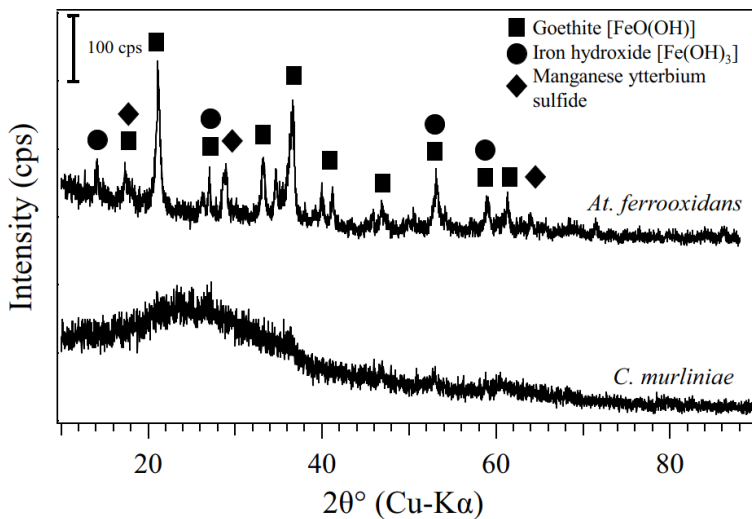
10 BIOKOROSI

Biokorosi, yang juga dikenal sebagai korosi yang dipengaruhi oleh mikrobiologi (MIC: *microbiologically influenced corrosion*), merupakan proses kompleks di mana mikroorganisme mempercepat degradasi logam. Fenomena ini menjadi perhatian utama dalam bidang metalurgi karena dampaknya yang signifikan terhadap ekonomi dan lingkungan. Mikroba, termasuk bakteri, fungi, dan alga, berperan dalam proses korosi dengan membentuk biofilm pada permukaan logam. Biofilm ini menciptakan mikro lingkungan yang dapat secara drastis mengubah kondisi elektrokimia di antarmuka logam, sehingga dapat mempercepat atau menghambat proses korosi (Widyanto, dkk., 2020).

Biokorosi melibatkan berbagai mekanisme yang dipicu oleh aktivitas mikroba. Salah satu mekanisme utama adalah modifikasi reaksi anodik dan katodik. Mikroorganisme dapat menghasilkan produk sampingan metabolisme seperti asam organik, hidrogen sulfida, dan amonia, yang dapat mengubah pH dan potensial redoks lingkungan, sehingga meningkatkan laju korosi. Sebagai contoh, bakteri pereduksi sulfat (SRB) dikenal karena perannya dalam biokorosi, terutama di lingkungan anaerobik. Bakteri SRB mereduksi sulfat menjadi sulfida, yang mengakibatkan pembentukan gas hidrogen sulfida yang korosif, yang dapat merusak logam seperti besi dan baja. Peran bakteri dalam proses biokorosi bervariasi tergantung pada karakteristik masing-masing bakteri tersebut. Sebagai contoh, dapat dilihat pada Gambar 15 bahwa bakteri pengoksidasi besi (*At. ferrooxidans*) dan bakteri pereduksi sulfat (*C. murlinae*) menghasilkan produk biokorosi yang berbeda. Produk korosi pada spesimen AISI yang diuji dengan *At. ferrooxidans* bersifat kristalin, dengan komposisi utama berupa goetit ($\text{FeO}(\text{OH})$), besi hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), dan mangan ytterbium sulfida. Sebaliknya, spesimen AISI yang diuji dengan *C. murlinae* menunjukkan sifat amorf. Hal ini mengindikasikan bahwa produk korosi tersebut mengandung bahan organik dari sel dan/atau produk metaboliknya, yang menghambat deteksi komposisi mineral oleh sinar-X (Widyanto, dkk., 2020).

Mekanisme lain melibatkan transfer elektron langsung antara mikroba dan permukaan logam. Beberapa bakteri dapat memperoleh elektron dari logam sebagai bagian dari proses respirasi mereka, dengan efektif menggunakan logam sebagai donor elektron. Transfer elektron ini dapat

merusak lapisan oksida pelindung pada logam, membuatnya lebih rentan terhadap korosi. Selain itu, matriks biofilm yang terdiri dari zat polimer ekstraseluler (EPS) dapat menjebak agen korosif di permukaan logam, yang lebih lanjut memicu korosi lokal (Chaerun, dkk., 2023b).



Gambar 15 Spektrum XRD dari produk korosi yang dihasilkan oleh *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Citrobacter murlinae* (Widyanto dkk., 2020).

Dampak biokorosi sangat luas, memengaruhi berbagai industri seperti minyak dan gas, pengolahan air, dan infrastruktur laut (Dilasari, dkk., 2024). Hal ini mengakibatkan degradasi material, peningkatan biaya pemeliharaan, dan potensi bahaya lingkungan. Untuk mengurangi biokorosi, berbagai strategi seperti aplikasi biosida, pemilihan material, dan penggunaan inhibitor korosi telah diterapkan. Penelitian terkini berfokus pada penggunaan biosurfaktan, senyawa ramah lingkungan yang dapat menghambat pembentukan biofilm dan mengurangi laju korosi dengan mengubah sifat permukaan. Memahami interaksi antara komunitas mikroba dan permukaan logam sangat penting untuk mengembangkan strategi pencegahan dan mitigasi yang efektif. Kemajuan dalam teknik analisis, seperti spektroskopi dan mikroskopi, telah meningkatkan kemampuan kita untuk mempelajari interaksi ini pada tingkat molekuler, memberikan wawasan tentang dinamika kompleks biokorosi, dan mengarahkan pengembangan praktik manajemen korosi yang lebih berkelanjutan dan efisien.

11 TANTANGAN DAN PERSPEKTIF MASA DEPAN DALAM BIOMETALURGI

Biometalurgi adalah bidang ilmu yang berkembang pesat dan menjadi solusi inovatif untuk tantangan lingkungan dalam sektor pertambangan dan metalurgi, serta semakin penting dalam pengembangan teknologi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Bidang ini menggabungkan prinsip-prinsip bioteknologi dan metalurgi untuk menciptakan proses yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dalam beberapa dekade terakhir, teknik biometalurgi seperti biomining, fitomining, urban biomining, bioremediasi, bioflotasi, bioflokulasi, biomineralisasi, bionanometalurgi, dan biokorosi telah berkembang sebagai alternatif terhadap proses-proses konvensional.

Biomining adalah salah satu cabang utama dalam biometalurgi, yang mencakup biooksidasi bijih emas refraktori dan bioleaching mineral sulfida serta oksida dengan menggunakan bakteri dan fungi. Metode ini menawarkan solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan teknik konvensional seperti sianidasi dan flotasi. Tantangan utama dalam biomining meliputi optimasi kondisi lingkungan untuk mendukung pertumbuhan mikroba yang efektif, terutama dalam bijih yang mengandung karbonat tinggi, yang dapat menghambat aktivitas bioleaching. Oleh karena itu, penelitian masa depan akan difokuskan pada pengembangan mikroba yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem dan peningkatan pemahaman tentang interaksi antara mikroba dan mineral. Sebagai contoh, biooksidasi telah menjadi teknik penting untuk memproses bijih emas refraktori yang sulit diolah dengan metode konvensional, terutama untuk bijih yang kaya karbonat. Demikian pula, *bioleaching* menggunakan bakteri dan fungi untuk melarutkan mineral sulfida dan oksida, memberikan alternatif yang lebih aman dan ramah lingkungan dibandingkan metode *leaching* kimiawi yang bergantung pada bahan berbahaya.

Fitomining merupakan teknologi yang relatif baru, tetapi memiliki potensi besar, di mana tanaman digunakan untuk mengekstraksi logam dari lahan bekas tambang atau bijih berkadar rendah. Teknik ini tidak hanya membantu mengurangi dampak lingkungan dari kegiatan pertambangan, tetapi juga dapat mengkonversi lahan bekas tambang menjadi area yang produktif. Fitomining menawarkan keuntungan dalam proses pengolahan

mineral dengan meningkatkan konsentrasi logam tanpa menggunakan bahan kimia berbahaya. Sebagai salah satu pendekatan inovatif dalam biometalurgi, fitomining memanfaatkan tanaman hiperakumulator untuk mengekstraksi logam dari tanah yang tercemar. Metode ini memberikan solusi berkelanjutan terhadap masalah limbah dan pencemaran lingkungan. Namun, tantangan utama yang dihadapi adalah efisiensi perolehan logam yang masih rendah serta kebutuhan akan teknologi pemrosesan yang lebih canggih untuk memaksimalkan hasil.

Urban biomining adalah pendekatan inovatif dalam biometalurgi yang memiliki potensi besar untuk diimplementasikan di masa depan, dengan fokus pada pemulihan logam berharga dari limbah elektronik dan baterai. Teknik ini menawarkan solusi berkelanjutan untuk masalah limbah dan pencemaran lingkungan, meskipun tantangan utamanya terletak pada efisiensi perolehan logam yang masih rendah serta kebutuhan akan teknologi pemrosesan yang lebih canggih. Urban biomining muncul sebagai metode yang menjanjikan dalam menghadapi meningkatnya volume limbah elektronik dan baterai. Dengan memanfaatkan mikroba untuk mengekstraksi logam berharga dari limbah ini, urban biomining tidak hanya mendukung upaya daur ulang, tetapi juga membantu mengurangi ketergantungan pada sumber tambang primer. Mengingat meningkatnya permintaan logam dalam industri teknologi tinggi, pengembangan teknologi ini menjadi semakin penting.

Bioremediasi Air Asam Tambang (AAT) dan limbah metalurgi adalah aspek penting dalam biometalurgi, di mana mikroba dimanfaatkan untuk menetralkan asam dan menghilangkan logam berat dari air limbah. Tantangan utama dalam bidang ini meliputi penentuan kondisi optimal bagi mikroba agar dapat berfungsi efektif dalam lingkungan yang sangat asam dan kaya logam berat. Selain itu, teknologi ini perlu dikembangkan agar dapat diterapkan pada skala besar dengan biaya yang terjangkau, sehingga implementasinya dalam industri dapat dilakukan secara luas. Bioremediasi AAT dan limbah metalurgi, dengan menggunakan mikroba, juga menjadi fokus utama dalam biometalurgi. AAT, yang sering menjadi masalah serius di daerah pertambangan, dapat dikelola lebih efektif melalui bioremediasi, di mana mikroba digunakan untuk menetralkan asam dan mengendapkan logam berat dari air limbah. Teknik ini tidak hanya mengurangi polusi, tetapi

juga berperan penting dalam pemulihan lingkungan di sekitar lokasi tambang.

Bioflotasi dan bioflokulasi adalah teknik dalam biometalurgi yang menawarkan metode lebih ramah lingkungan untuk memisahkan mineral berharga dari mineral pengotor. Teknik ini menggunakan agen biologis, seperti mikroba atau produk metabolit mikroba seperti biosurfaktan, sehingga proses flotasi dan flokulasi dapat dilakukan tanpa bahan kimia berbahaya. Tantangan utama dalam penerapan teknik ini adalah mengembangkan agen biologis yang dapat bersaing dengan bahan kimia tradisional dari segi efisiensi dan biaya. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami interaksi spesifik antara agen biologis dan mineral target guna mengoptimalkan proses ini. Dalam konteks bioflotasi, mikroba atau produk metabolitnya berfungsi sebagai agen pengapung yang mengubah sifat permukaan mineral, memungkinkan pemisahan yang lebih efektif. Sementara itu, bioflokulasi memanfaatkan mikroba untuk menggumpalkan partikel halus dalam suspensi, mempermudah proses pemisahan dan pemurnian mineral. Dengan demikian, kedua teknik ini berpotensi menjadi solusi inovatif dalam pemrosesan mineral yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Biominalisasi, terutama dengan teknik MICCP (*Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation*), telah menunjukkan potensi besar dalam penguatan beton dan mortar. Dengan memanfaatkan mikroba untuk mengendapkan kalsium karbonat, teknik ini dapat meningkatkan kekuatan struktural material bangunan, menjadikannya lebih tahan lama dan berkelanjutan. Hal ini sangat penting dalam industri konstruksi yang mencari solusi inovatif untuk mengurangi dampak lingkungan.

Bionanometalurgi adalah area yang sedang berkembang pesat, di mana mikroba dan tanaman dimanfaatkan untuk menghasilkan nanometal dan bahan mineral lainnya dengan sifat unik. Aplikasi teknik ini mencakup sintesis nanometal untuk berbagai industri, seperti elektronik dan medis. Tantangan utama yang dihadapi adalah pengembangan metode yang mampu menghasilkan nanometal dengan kemurnian dan ukuran yang konsisten, serta pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme biominalisasi untuk meningkatkan kontrol proses. Perspektif masa depan di bidang ini sangat menjanjikan, terutama dalam konteks pengembangan material baru

yang berkelanjutan dan penerapan teknologi canggih. Penggunaan mikroba dan tanaman dalam bionanometalurgi telah menarik perhatian karena teknik ini memungkinkan produksi nanopartikel logam dengan kontrol yang lebih baik terhadap ukuran dan bentuk, serta memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan metode sintesis konvensional. Potensi aplikasinya mencakup bidang katalis, farmasi, dan material fungsional lainnya, menjadikan bionanometalurgi sebagai solusi inovatif untuk produksi material yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

Biokorosi merupakan salah satu fokus utama dalam biometalurgi, terutama dalam industri minyak, gas, dan lingkungan maritim. Mikroba yang menyebabkan korosi pada logam dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme biokorosi dan pengembangan strategi mitigasi yang efektif sangat diperlukan. Penggunaan bioteknologi untuk mengendalikan atau bahkan memanfaatkan proses biokorosi sebagai alat rekayasa permukaan logam menawarkan tantangan dan peluang menarik di masa depan. Meskipun biokorosi sering kali dianggap sebagai masalah, penelitian lebih lanjut dapat membuka jalan untuk strategi pengelolaan yang lebih baik, seperti dalam *bioleaching* atau pembersihan permukaan logam. Dengan pemahaman yang lebih baik, proses ini tidak hanya dapat dikendalikan tetapi juga dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi industri, menjadikan biokorosi sebagai area penelitian yang penting dan penuh potensi dalam pengembangan teknologi biometalurgi.

Biometalurgi di Indonesia memiliki potensi besar untuk menciptakan industri pertambangan dan metalurgi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, terutama mengingat kekayaan sumber daya mineral yang dimiliki dan meningkatnya permintaan nikel untuk kendaraan listrik (EV = electric vehicle). Indonesia, sebagai produsen hampir setengah dari nikel dunia, memainkan peran penting dalam rantai pasokan global EV, yang mendorong perlunya pengembangan praktik berkelanjutan guna mengurangi dampak lingkungan dari penambangan dan pengolahan nikel. Metode hidrometalurgi yang saat ini digunakan, seperti *High-Pressure Acid Leaching* (HPAL), menghasilkan volume limbah *tailings* yang besar dan berpotensi membahayakan ekosistem. Oleh karena itu, pengelolaan limbah *tailings* melalui metode daur ulang menjadi sangat krusial untuk mengurangi dampak lingkungan.

Biometalurgi, yang memanfaatkan proses biologi untuk ekstraksi logam, menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dengan mengurangi konsumsi energi dan meminimalkan produk sampingan berbahaya, serta menjadi opsi yang tepat untuk mendaur ulang limbah tailings. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan Indonesia untuk memperkuat kapasitas manufaktur EV sekaligus mengatasi isu-isu lingkungan seperti deforestasi, kehilangan keanekaragaman hayati, dan polusi yang diakibatkan oleh praktik penambangan konvensional. Dengan mengintegrasikan biometalurgi, Indonesia dapat memanfaatkan kekayaan mineralnya untuk membangun industri pertambangan dan metalurgi yang berkelanjutan, mendaur ulang limbah pertambangan dan limbah metalurgi, mendukung transisi ke teknologi energi yang lebih bersih, dan berkontribusi terhadap upaya global dalam memerangi perubahan iklim.

Secara keseluruhan, biometalurgi menawarkan solusi inovatif untuk tantangan lingkungan yang dihadapi oleh industri pertambangan dan metalurgi saat ini. Dengan kemajuan teknologi dan peningkatan pemahaman ilmiah, bidang ini memiliki potensi besar untuk mewujudkan proses-proses yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan di masa depan. Namun, untuk mencapai optimasi berbagai teknik biometalurgi yang ada saat ini, penelitian dan pengembangan lebih lanjut sangat diperlukan. Di masa mendatang, tantangan utama dalam biometalurgi meliputi pengembangan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta penerapan metode-metode tersebut pada skala industri. Kolaborasi antara ilmuwan dari berbagai disiplin ilmu, termasuk biologi, kimia, teknik, dan metalurgi, akan menjadi kunci dalam mengatasi tantangan ini. Mengingat tekanan yang semakin meningkat untuk mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas industri, biometalurgi menawarkan prospek masa depan yang cerah, di mana proses-proses berkelanjutan dan ramah lingkungan diharapkan dapat menjadi standar baru dalam industri pertambangan dan metalurgi.

12 PENUTUP

Penutup buku orasi ilmiah "Biometalurgi sebagai Solusi Inovatif untuk Tantangan Lingkungan Menuju Proses yang Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan" menawarkan refleksi mendalam tentang pentingnya inovasi teknologi dalam menghadapi tantangan lingkungan yang semakin kompleks. Inovasi seperti biometalurgi, yang mengintegrasikan prinsip-prinsip biologi dan metalurgi, menunjukkan bagaimana pendekatan interdisipliner dapat menciptakan proses industri yang lebih efisien dan berkelanjutan sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Keberhasilan pengembangan dan implementasi teknologi ramah lingkungan seperti biometalurgi sangat bergantung pada kolaborasi antardisiplin dan integrasi pengetahuan dari berbagai bidang. Kolaborasi ini dapat diperkuat melalui pendekatan seperti *Open Innovation* dan penerapan ekonomi sirkuler, yang mempercepat adopsi teknologi baru dan memperluas dampaknya di industri. Selain itu, pendidikan formal dan peningkatan kesadaran masyarakat memiliki peran penting dalam menciptakan generasi yang peduli dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Program-program pendidikan harus terus diperkuat untuk membentuk pola pikir dan perilaku yang mendukung keberlanjutan.

Industri pertambangan dan metalurgi memikul tanggung jawab besar untuk menerapkan proses-proses yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, mengingat dampak signifikan dari aktivitas mereka terhadap ekosistem. Komitmen yang kuat dalam mengadopsi teknologi hijau sangat penting, salah satunya melalui pelatihan intensif bagi karyawan untuk memahami dan menerapkan praktik terbaik dalam pengelolaan lingkungan. Selain itu, program Tanggung Jawab Sosial Perusahaan (CSR: *Corporate Social Responsibility*) dapat berfungsi sebagai alat strategis dalam meningkatkan kesadaran dan partisipasi masyarakat sekitar dalam upaya pelestarian lingkungan.

Teknologi biometalurgi, yang memanfaatkan organisme (mikroba dan tumbuhan) untuk ekstraksi logam dari bijih dan limbah metalurgi, menawarkan solusi inovatif dan berkelanjutan dengan mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan emisi karbon. Dengan mengintegrasikan pendekatan biometalurgi, industri dapat meminimalkan

dampak lingkungan dan berkontribusi secara signifikan terhadap pembangunan berkelanjutan.

Selanjutnya, penerapan teknologi biometalurgi dan inovasi yang serupa membutuhkan dukungan kebijakan yang efektif serta koordinasi intensif antara pemerintah, sektor industri, dan masyarakat sipil. Kolaborasi ini esensial untuk menjamin bahwa inovasi yang dikembangkan dapat diadopsi secara luas dan berkontribusi pada dampak positif yang berkelanjutan. Dalam konteks ini, komitmen terhadap perubahan fundamental dalam cara kita memahami dan berinteraksi dengan lingkungan menjadi sangat krusial. Proses dekolonisasi ilmu pengetahuan dan transformasi paradigma pendidikan sangat diperlukan untuk membentuk masyarakat yang lebih harmonis dan berkelanjutan.

Dengan demikian, buku orasi ilmiah ini tidak hanya menyajikan wawasan ilmiah yang berharga, tetapi juga mendorong aksi nyata menuju masa depan yang lebih berkelanjutan. Komitmen pada inovasi, kolaborasi, dan keberlanjutan adalah kunci untuk menciptakan dunia yang lebih baik bagi generasi mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, M., Xiao, B., Xiao, P., Zhao, P., Li, R. and Bibi, S., 2022. Research progress on heavy metals pollution in the soil of smelting sites in China. *Toxics*, 10(5), 231.
- Ankireddy, P.R., Purushotham, S. and Narasimha, M., 2023. Fluid Flow Modeling and Analysis of Low-and High-Gravity Spiral Concentrators: Experimental and Analytical Approaches. *Chemical Engineering & Technology*, 46(8), 1619-1629.
- Chaerun, S.K., Tazaki, K. and Okuno, M., 2013. Montmorillonite mitigates the toxic effect of heavy oil on hydrocarbon-degrading bacterial growth: implications for marine oil spill bioremediation. *Clay Minerals*, 48(4), pp.639-654.
- Chaerun, S.K., Putri, F.Y., Mubarak, M.Z., Minwal, W.P. and Ichlas, Z.T., 2017. Bioleaching of supergene porphyry copper ores from sungai Mak Gorontalo of Indonesia by an iron-and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium. *Solid State Phenomena*, 262, pp.20-23.
- Chaerun, S.K., Sulistyono, R.S., Minwal, W.P. and Mubarak, M.Z., 2017a. Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy*, 174, pp.29-37.
- Chaerun, S.K., Putri, F.Y., Minwal, W.P., Ichlas, Z.T. and Mubarak, M.Z., 2018. Bacterial leaching of an Indonesian complex copper sulfide ore using an iron-oxidizing indigenous bacterium. *Microbiology Indonesia*, 12(1), p.1.
- Chaerun, S.K., Mubarak, M.Z., Winarko, R., Puspasari, N. (2020). Bioleaching tembaga sulfida dengan menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi sulfur di dalam tangki berpengaduk. Indonesian Patent IDP000069926, 23 Juli 2020.
- Chaerun, S.K., Sanwani, E., Maulidiah, N.L.I. (2020a). Proses bioflokulasi mineral silika (SiO₂) menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi besi sebagai bioflokulan. Indonesian Patent IDP000073841, 18 Desember 2020.
- Chaerun, S.K., Putri, E.A. and Mubarak, M.Z., 2020b. Bioleaching of Indonesian galena concentrate with an iron-and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium at room temperature. *Frontiers in Microbiology*, 11, p.557548.

- Chaerun, S.K., Rahayu, S., Rizki, I.N. and Pane, I., 2020c. Utilization of a new locally isolated bacterial strain for promoting mechanical properties of mortar. *International Journal of Civil Engineering*, 18, pp.665-671.
- Chaerun, S.K., Syarif, R. and Wattimena, R.K., 2020d. Bacteria incorporated with calcium lactate pentahydrate to improve the mortar properties and self-healing occurrence. *Scientific reports*, 10(1), p.17873.
- Chaerun, S.K., Prabowo, B.A. and Winarko, R., 2022. Bionanotechnology: the formation of copper nanoparticles assisted by biological agents and their applications as antimicrobial and antiviral agents. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, p.100703.
- Chaerun, S.K., Winarko, R. and Butarbutar, P.P., 2022a. Selective Dissolution of Magnesium from Ferronickel Slag by Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacteria at Room Temperature. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8(3), pp.1014-1025.
- Chaerun, S.K., Winarko, R. and Yushandiana, F., 2023. Biohydrometallurgy: paving the way for a greener future of mineral processing in Indonesia-A mini review. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 5(1), pp.299-307.
- Chaerun, S.K., Jeremy, E., Chaerun, R.I., Fathira, R.L., Toynbee, M.I., Supandi, S. and Sato, T., 2023a. Coal mine wastes: Effective mitigation of coal waste slurry and acid mine drainage through bioflocculation using mixotrophic bacteria as bioflocculants. *International Journal of Coal Geology*, 279, p.104370.
- Chaerun, S.K., Rizki, I.N., Hartomo, W.A. and Widyanto, B., 2023b. Biocorrosion behaviour of carbon steels by tropical microbes in the presence of corrosion-inhibiting bacterium. *HAYATI Journal of Biosciences*, 30(1), pp.1-16.
- Diab, M., Abu El Ghar, M., Mohamed Gaafar, I., Mohamed El Shafey, A.H., Wageh Hussein, A. and Fawzy, M.M., 2022. Potentiality of physical upgrading for valuable heavy minerals from Sermatai area, Egypt. *Journal of Mining and Environment*, 13(1), 15-32.
- Dilasari, B., Toynbee, M.I. and Chaerun, S.K., 2024. Biocorrosion of 5083 aluminium alloy by *Citrobacter freundii* SKC-4 in seawater. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 543, p. 03004). EDP Sciences.
- Dong, X., Huang, X., Tang, R., Min, Y., Xu, Q., Hu, Z. and Shi, P., 2023. Efficient Photo-Oxidation Leaching of Ni and Co in a Spent Lithium-Ion Battery

- Cathode by Homogeneous UV/H₂O₂. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11 (25), 9330-9336.
- Flemming, H.C. and Wingender, J., 2010. The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), pp.623-633.
- Hosseinniaee, S., Jafari, M., Tavili, A., Zare, S. and Cappai, G., 2023. Chelate facilitated phytoextraction of Pb, Cd, and Zn from a lead-zinc mine contaminated soil by three accumulator plants. *Scientific Reports*, 13(1), p.21185.
- Iturrondobeitia, M., Vallejo, C., Berroci, M., Akizu-Gardoki, O., Minguez, R. and Lizundia, E., 2022. Environmental impact assessment of LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂ hydrometallurgical cathode recycling from spent lithium-ion batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(30), 9798-9810.
- Jeremy, E., Sanwani, E., Chaerun, S.K. and Mubarok, M.Z., 2024. Exploring Bioflocculation: A Novel Approach for Iron Recovery From Red Mud—a Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, pp.1-21.
- Kabatesi, J.C., Uwizeyimana, J., Rwabuhungu Rwatangabo, D.E. and Wang, J.P., 2022. Evaluation of Efficiency of Using Mechanized Processing Techniques to Recover Tin and Tantalum in Gatsibo, Eastern Province, Rwanda. *Minerals*, 12(3), 315.
- Keane, S., Bernaudat, L., Davis, K.J., Stylo, M., Mutemeri, N., Singo, P., Twala, P., Mutemeri, I., Nakafeero, A. and Etui, I.D., 2023. Mercury and artisanal and small-scale gold mining: Review of global use estimates and considerations for promoting mercury-free alternatives. *Ambio*, 52(5), 833-852.
- Mubarok, M.Z., Winarko, R., Chaerun, S.K., Rizki, I.N. and Ichlas, Z.T., 2017. Improving gold recovery from refractory gold ores through biooxidation using iron-sulfur-oxidizing/sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria. *Hydrometallurgy*, 168, pp.69-75.
- Mubarok, M.Z., Chaerun, S.K., Winarko, R. (2021). Metode biooksidasi dalam pra-pengolahan bijih emas yang refraktori menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi besi. Indonesian Patent IDP000073962, 4 Januari 2021.
- Neumann, J., Petranikova, M., Meeus, M., Gamarra, J.D., Younesi, R., Winter, M. and Nowak, S., 2022. Recycling of lithium-ion batteries—current state of the art, circular economy, and next generation recycling. *Advanced energy materials*, 12(17), 2102917.

- Qin, Z., Wen, Z., Xu, Y., Zheng, Z., Bai, M., Zhang, N., Jia, C., Wu, H.B. and Chen, G., 2022. A ternary molten salt approach for direct regeneration of LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ cathode. *Small*, 18(43), 2106719.
- Raabe, D., 2023. The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical Reviews*, 123(5), 2436-2608.
- Roberto, F. F., & Schippers, A. (2022). Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(18), 5913-5928.
- Rus, A.M.M., Winarko, R., Chaerun, S.K., Mufakhir, F.R., Astuti, W. and Minwal, W.P., 2024. Bioleaching of rare earth elements (REEs) from Indonesian red mud by the bacterium *Bacillus nitratireducens* strain SKC/L-2. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 543, p. 02014). EDP Sciences.
- Sanwani E., Jeremy E., Chaerun S.K., Mufakhir F.R., Astuti W. (2022) Use of mixotrophic bacteria as flocculating agents to separate iron from red mud (alumina refinery residue). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8, 443–457.
- Sanwani E., Chaerun S.K., Husni H., Pamungkas T., Rasyid M.A. (2021). A biosurfactant-producing and iron-oxidizing mixotrophic bacterium as an environmentally friendly reagent for eco-green flotation of Indonesian complex Pb-Zn ores. *Minerals Engineering*, 170, 106824.
- Sanwani E., Chaerun S.K., Husni H., Rasyid M.A. (2021a). Surface modification of galena concentrate, sphalerite concentrate and silica by the bacterium *Citrobacter* sp. and its application to green flotation of complex Pb-Zn ores. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3), 1265-1279.
- Sanwani, E., Lamandhi, N. B., Husni, H., Chaerun, S. K., Astuti, W., & Mufakhir, F. R. (2020). Influence of indigenous mixotrophic bacteria on pyrite surface chemistry: Implications for bioflotation. *Microbiology Indonesia*, 14(1), 1-6.
- Sanwani, E., Mirahati, R.Z., & Chaerun, S.K. (2017). Recovery of copper from pyritic copper ores using a biosurfactant-producing mixotrophic bacterium as bioflotation reagent. *Solid State Phenomena* 262, 181-184.
- Sanwani, E., Hidayati, D., & Chaerun, S.K. (2016). Utilization of the bacteria *Bacillus pumilus* and *Citrobacter youngae* as flotation bioreagents in the microflotation of chalcopyrite, pyrite, and silica. *Microbiology Indonesia*, 10(1), 15-22.
- Sanwani, E., Chaerun, S., Mirahati, R., & Wahyuningsih, T. (2016a). Bioflotation: bacteria-mineral interaction for eco-friendly and sustainable mineral processing. *Procedia Chemistry*, 19, 666-672.

- Sanwani, E., Mirahati, R. Z., & Chaerun, S. K. (2015). Possible role of the biosurfactant-producing and Fe-S-oxidizing bacterium in silicate and sulfide bioflotation processes. *Advanced Materials Research*, 1130, 493-498.
- Sanwani, E., Wahyuningsih, T., & Chaerun, S. K. (2015a). Assessment of surface properties of silica-bacterial cell complex: a potential application for silicate bioflotation processes. *Advanced Materials Research*, 1130, 515-518.
- Sanwani E., Mirahati R.Z., Chaerun S.K. (2015b). Bioflotation as a clean technology in mineral processing: experimental study of pyrite minerals. *Proceedings of TEKMIIRA Colloquium 2015, Bandung, Indonesia, November 3-4, 2015, ISBN: 978-979-8641-93-0, pp 19-25.*
- Sanwani E., Wahyuningsih T., Chaerun S.K. (2015c). A biosurfactant-producing- and sulfur-oxidizing bacterium: its potential as eco-friendly bioreagents for bioflotation processes. *Proceedings of TEKMIIRA Colloquium 2015, Bandung, Indonesia, November 3-4, 2015, ISBN: 978-979-8641-93-0, pp 97-103.*
- Sanwani E., Mirahati R.Z., Chaerun SK. (2015d). Changes in surface chemical properties of pyrite caused by a biosurfactant-producing bacterium: Implications for eco-friendly bioflotation reagents in sulfide mineral processing. *Proceeding of the 14th International Conference on QIR (Quality in Research), Lombok, Indonesia, 10-13 August 2015, pp. 1014-1018.*
- Satriadi, T., Winarko, R., Chaerun, S.K., Minwal, W.P. and Mubarok, M.Z., 2024. Recycling of spent electric vehicle (EV) batteries through the biohydrometallurgy process. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 543, p. 02008). EDP Sciences.
- Sun, Y., 2023. Lithium-Ion Battery Recycling: Challenges and Opportunities. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 58, 365-370.
- Syarif, R., Rizki, I.N., Wattimena, R.K. and Chaerun, S.K., 2019. Selection of bacteria inducing calcium carbonate precipitation for self-healing concrete application. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 1(1), pp.26-30.
- Syarif, R., Chaerun, R.I., Chaerun, S.K., Prasetyo, S.H. and Wattimena, R.K., 2024. Construction biotechnology: improving mortar properties through calcium carbonate precipitation using a novel strain of the bacterium *Neisseria perflava*. *Discover Civil Engineering*, 1(1), pp.1-13.

- Syarif, R., Chaerun, S.K. and Wattimena, R.K., 2024a. Biomineralization Biotechnology Utilizing *Lysinibacillus sphaericus* to Improve Mechanical Properties of Mortar. *HAYATI Journal of Biosciences*, 31(1), pp.48-58.
- Teniola, O.S., Adeleke, A.A., Ibitoye, S.A. and Shitu, M.D., 2022. Effectiveness of Gravity Separation of Low Grade Nigerian Gold Ore Using Shaking Table. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*, 10(2), 15-22.
- Wahyuningsih T., Chaerun S.K., Sanwani E. (2020). Characterization of interaction of biosurfactant-producing bacteria with pyrite minerals as an alternative to depressant reagents in the bioflotation process of copper sulfide minerals that are more environmentally friendly. AIP Conference Proceedings 2245, 080005.
- Wahyuningsih T., Sanwani E., Chaerun S.K. (2018). Potensi bakteri penghasil biosurfaktan sebagai frothing agent pada proses konsentrasi flotasi. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, Vol. 4, No. 1, Maret-Agustus, pp. 207-212.
- Wahyuningsih T., Sanwani E., Chaerun S.K., (2017). Bioflotasi bijih tembaga: Kadar meningkat tanpa reagen kimia (aplikasi bakteri mixotrof pengoksidasi sulfur). *Prosiding SEMNAS XII 2017, Seminar Nasional Kebumihan XII, Fakultas Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta*, pp. 523-528.
- Widyanto, B., Chaerun, S.K., Hartomo, W.A. and Rizki, I.N., 2020. Biocorrosion behavior of AISI 1006 carbon steel protected by biofilm of *Bacillus subtilis* by an iron-oxidizing bacterium and a sulfate-reducing bacterium. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 6, pp.1-9.
- Winarko, R., Mubarok, M.Z., Rizki, I.N., & Chaerun, S.K. (2015). Biooxidation of carbonaceous refractory gold ores by an iron-sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium at neutral pH. *Advanced Materials Research* 1130, 440-444.
- Yin, F., Li, J., Wang, Y. and Yang, Z., 2024. Biodegradable chelating agents for enhancing phytoremediation: Mechanisms, market feasibility, and future studies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, p.116113.
- Zheng, X., Jing, Z., Sun, Z., Du, L., Xue, Z., Lu, D., Yasi, G. and Wang, Y., 2022. Significantly improved separation efficiency of refractory weakly magnetic minerals by pulsating high-gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(31), 10105-10118.

CURRICULUM VITAE



Nama : Prof. Ir. Siti Khodijah Chaerun, M.T.,
Ph.D.

Tempat/tgl. lahir : Sampang, 5 Juli 1969

Kel. Keahlian : Teknik Metalurgi

Alamat : Prodi Teknik Metalurgi, FTMM – ITB

Kantor : Ganesha 10, Bandung 40132

Nama Suami : Dr. Chaerun Anwar, S.Pd., M.Pd.

Nama Anak : Chaerunnisa Fitratul Islam, B.A., M.A.
(Anak ke-1)

Chaerun Raudhatul Islam, B.Sc., M.Eng.,
Ph.D. (Anak ke-2)

Ronny Winarko, S.T., M.T., Ph.D.
(Menantu)

Isa Albarack Winarko (Cucu)

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- S.T. (Ir.) Department of Environmental Engineering, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia (1988 – 1993).
- M.T. Department of Environmental Engineering, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia (1996 – 1999).
- Ph.D. (D.Sc.) Department of Earth Sciences, Division of Global Environmental Science and Engineering, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Ishikawa, Japan (2001 – 2004).
- Post-Doctoral Researcher (DAAD fellowship) at the Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Institute of Landscape Matter Dynamics & Institute of Soil Landscape Research, Munchenberg, Germany (2006).
- Visiting Scientist at the Graduate School of Bio-applications and Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan (2007).
- Postdoctoral Associate (IsDB fellowship) at the Department of Microbiology, the University of Georgia, Athens, GA, USA (2008 – 2009).

- Visiting Research Fellows (Chinese Government fellowship) at the Department of Energy and Resources Engineering, College of Engineering, Peking University, Beijing, P.R. China (2011 – 2014).

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

- 1 April 2006 – 31 October 2009: Lecturer & Researcher - SITH
- 1 November 2009 – 31 May 2011: Assistant Professor - SITH
- 1 September 2014 – 30 November 2020: Assistant Professor – FTTM
- 1 December 2020 – 31 July 2023: Associate Professor – FTTM
- 1 January 2021 – 31 December 2022: Head of the Undergraduate Program, Metallurgical Engineering Department, FTTM
- 1 August 2023 – present: Full Professor - FTTM

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- 1 April 2006 - 30 September 2021: IIIc
- 1 Oktober 2021- 30 September 2023: IIIId
- 1 Oktober 2023 - present: IVa

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- 1 April 2006 - 31 Oktober 2009: Lecturer & Researcher - SITH
- 1 November 2009 - 31 Mei 2011: Assistant Professor - SITH
- 1 September 2014 - 30 November 2020: Assistant Professor - FTTM
- 1 Desember 2020 - 31 Juli 2023: Associate Professor – FTTM
- 1 Agustus 2023 - sekarang: Full Professor - FTTM

V. KEGIATAN PENELITIAN

- [2006] **"Physicochemical characterization of tsunami-impacted agricultural soils,"** funded by the German Academic Exchange Service (DAAD) with an amount of €3,600.
- [2008-2009] **"Molecular biogeochemical characterization of tsunami-impacted agricultural soils"** funded by the Islamic Development Bank (IsDB) with an amount of US\$ 22,000.
- [2007-2009] **"The potential of sediments as natural fertilizers and artificial soils for restoring and improving soil quality of dry-lands"** funded by the Ministry of Research and Technology of Indonesia

(Incentive Program) with an amount of US\$ 70,000 (With Assoc. Prof. Dr. I Nyoman P. Aryantha)

- [2008-2009] "**Molecular biogeochemical characterization of agricultural soils contaminated with industrial wastewaters: implications for bioremediation**" funded by the IA-ITB of Indonesia with an amount of US\$ 14,000.
- [2010] "**Isolation and characterization of mercury (Hg)-resistant bacteria isolated from river sediments contaminated with mining wastes**" funded by the Directorate General of Higher Education, the Ministry of National Education of Indonesia (National Strategy Grant) with an amount of US\$ 8,400.
- [2011-2014] "**Molecular biogeochemical characterization of aromatics-degrading bacteria capable of producing biosurfactants by consuming sulfur (S) for developing strategies of bioremediation, microbial enhanced oil recovery (MEOR), biohydrometallurgy and biodesulfurization**" funded by the Chinese Government with an amount of US\$ 35,000.
- [2015] "**Bioflotation of copper sulfide ores using biosurfactant-producing bacteria**" funded by the 2015 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 15,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).
- [2017] "**Bioleaching of lead from galena concentrates using iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria**" funded by the 2017 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 5,000.
- [2017] "**Bioflotation of sulfide ores containing lead and zinc using biosurfactant-producing bacteria as flotation bioreagent**" funded by the 2017 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 5,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).
- [2018-2019] "**Bioleaching of copper from copper sulfide ores using iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria**" funded by the Ministry of Research, Technology and Higher Education of the Republic of Indonesia, with an amount of US\$ ~25,000.

- [2018] **"Bioleaching of magnesium (Mg) from ferronickel slags using iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria"** funded by the 2018 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 5,000.
- [2018] **"Coal biobeneficiation using biosurfactant-producing bacteria capable of oxidizing iron and sulfur"** funded by the 2018 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 5,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).
- [2019] **"Bioleaching of zinc (Zn) from zinc sulfide concentrates using iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria"** funded by the 2019 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 5,000.
- [2019] **"Optimization of bioflotation parameters of sulfide minerals using biosurfactant-producing bacteria as flotation bioreagents to improve bioflotaion process performances"** funded by the 2019 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of US\$ 5,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).
- [2019] **"Optimasi produksi bio-coal berbasis teknologi mikroba lokal sebagai bahan bakar alternatif yang murah dan ramah lingkungan dari pengelolaan dan pemanfaatan sampah domestik"** funded by the 2019 Innovation Program, Institute for Innovation and Entrepreneurship Development (LPIK), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 175,000,000.
- [2020] **"Bioflokulasi selektif untuk proses konsentrasi besi dari red mud (*alumina refinery residue*)"** funded by the 2020 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 77,000,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).
- [2020] **"Biooksidasi Bijih Emas Refraktori Menggunakan Bakteri Mixotrof Pengoksidasi Besi dan Sulfur dan Penghasil Biosurfaktan"** funded by the 2020 Research and Innovation Program, Institute for

Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 77,000,000.

- [2020] "**Sintesis bioflokulan untuk penurunan kekeruhan dan penyisihan *total suspended solid* (TSS) pada pengolahan air baku PDAM dan limbah cair industri tekstil**" funded by the 2020 Innovation Program, Institute for Innovation and Entrepreneurship Development (LPIK), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 250,000,000.
- [2020] "**Produksi bionanometal tembaga (Cu) menggunakan tanaman kratom (*Mitragyna speciosa*) sebagai agen pereduksi untuk lapisan dalam masker pelindung diri dari covid-19**" funded by the 2020 Innovation Program, Institute for Innovation and Entrepreneurship Development (LPIK), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 98,500,000.
- [2021-2022] "**Potensi limbah batubara (*fly ash* dan *fine coal*) dan bakteri bioleaching sebagai pupuk biomineral batubara dalam upaya reklamasi lahan bekas tambang dengan teknik agroforestri**" funded by the Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional of the Republic of Indonesia, with an amount of IDR ~200,000,000.
- [2021] "**Optimasi Parameter-Parameter Proses Biobenefisiensi Batubara Menggunakan Bakteri Mixotrof untuk Peningkatan Kualitas Batubara**" funded by the 2021 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 90,000,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).
- [2021] "**Pengaruh *microbially induced calcium carbonate precipitation* dengan *fly ash* dan *slag* terhadap stabilisasi tanah pasir untuk peningkatan ketahanan infrastruktur**" funded by the 2021 Research Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR ~150,000,000
- [2022] "**Optimasi Parameter-Parameter Proses Bioflokulasi Selektif Besi dari Red mud sebagai Alternatif Bahan Baku Industri Besi Baja**" funded by the 2022 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 90,000,000 (With Assoc. Prof. Dr. Edy Sanwani).

- [2022-2024] "**Versatile Agriculture by Fertilizers with QDs Enhanced Nano-composite Hydrogels for Sustainable Food Production**" funded by the 2022 JFS Southeast Asia - Europe with an amount of IDR 1,050,000,000.
- [2023] "**Interaksi bakteri mixotrof dengan *red mud* dan karakterisasinya dalam proses bioflokulasi selektif besi dari *red mud* sebagai pra-pengolahan untuk meningkatkan performa bioleaching logam tanah jarang (LTJ) dari *red mud***" funded by the 2023 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR 45,000,000.
- [2023-2024] "**Ekonomi sirkular abu terbang batubara sebagai sumber logam tanah jarang untuk bahan baku pengembangan material maju yang ramah lingkungan dan berkelanjutan**" funded by the RIIM - BRIN with an amount of IDR 190,000,000.
- [2023] "**Inovasi *green technology* pemanfaatan *red mud* (produk samping pemurnian alumina) sebagai sumber besi (Fe) dengan metode bioflokulasi**" funded by the MIND ID with an amount of IDR 400,000,000.
- [2024] "**Produksi *Bio-Coal* Berbasis Teknologi Mikroba Sebagai Bahan Bakar Alternatif yang Murah dan Ramah Lingkungan dari Pengelolaan dan Pemanfaatan Sampah Domestik**" funded by the 2024 Research and Innovation Program, Institute for Research and Community Services (LPPM), Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia with an amount of IDR ~90,000,000.

VI. PUBLIKASI

1. Syarif, R., Chaerun, R.I., **Chaerun, S.K.**, Prassetyo, S.H. and Wattimena, R.K., 2024. Construction biotechnology: improving mortar properties through calcium carbonate precipitation using a novel strain of the bacterium *Neisseria perflava*. *Discover Civil Engineering*, 1(1), pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00047-1>
2. **Chaerun, S.K.**, Putri, A.C., Winarko, R., Chaerun, R.I., Sato, T. 2024. Application of biohydrometallurgy in Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS): Carbonate precipitation by *Bacillus subtilis* as a biocatalyst using calcium-enriched pregnant leach solutions from steel slag bioleaching. *Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024*, Springer Nature Switzerland AG 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_195

3. Harbowo, D.G., Aswan, Zaim, Y., **Chaerun, S.K.**, Chaerun, R.I., Astuti, W. and Sato, T., 2024. Microanalytical approaches on the silicification process of wood fossil from Jasinga, West Java, Indonesia. *Scientific Reports*, 14(1), p.19101. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69681-0>
4. Harbowo, D.G., Aswan, **Chaerun, S.K.**, Astuti, W. and Zaim, Y., 2024. Exploring Pliocene Vegetation Variability through Wood Fossil Analysis from Jasinga, Indonesia. *Tropical Natural History*, 24, pp.31-47.
5. Jeremy, E., Sanwani, E., **Chaerun, S.K.** and Mubarok, M.Z., 2024. Exploring Bioflocculation: A Novel Approach for Iron Recovery from Red Mud—a Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, pp.1-21. <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2328688>
6. Syarif, R., **Chaerun, S.K.** and Wattimena, R.K., 2024. Biomineralization Biotechnology Utilizing *Lysinibacillus sphaericus* to Improve Mechanical Properties of Mortar. *HAYATI Journal of Biosciences*, 31(1), pp.48-58. [DOI:10.4308/hjb.31.1.48-58](https://doi.org/10.4308/hjb.31.1.48-58)
7. Deviany, D., & **Chaerun, S.K.** (2024). Limitations of the First and Second Generation of Solid-Gaseous Biofuels in a Time of Climate Emergency. In: *Technological Advancements in Solid-Gaseous Biofuels Production*. Wiley Scrivener Publishing LLC (Book Chapter). <https://doi.org/10.1002/9781394204816.ch9>
8. Martgrita, M.M. and **Chaerun, S.K.**, 2024. Circular Bioeconomy in the Recovery of Polymers from Sewage Sludge. *Sewage and Biomass from Wastewater to Energy*, pp.365-390, Wiley Scrivener Publishing LLC (Book Chapter). <https://doi.org/10.1002/9781394204502.ch14>
9. Ahmed, M.T., Farooqui, S.A., Hsu, SH., Daeun, L., **Chaerun, S.K.** (2024). Valorizing Glycerol into Valuable Chemicals Through Photocatalytic Processes Utilizing Innovative Nano-Photocatalysts. In: Abdullah, H. (eds) *Solar Light-to-Hydrogenated Organic Conversion*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8114-4_4
10. Satriadi, T., Winarko, R., **Chaerun, S.K.**, Minwal, W.P. and Mubarok, M.Z., 2024. Recycling of spent electric vehicle (EV) batteries through the biohydrometallurgy process. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 543, p. 02008). EDP Sciences.
11. Rus, A.M.M., Winarko, R., **Chaerun, S.K.**, Mufakhir, F.R., Astuti, W. and Minwal, W.P., 2024. Bioleaching of rare earth elements (REEs) from Indonesian red mud by the bacterium *Bacillus nitratireducens* strain SKC/L-2. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 543, p. 02014). EDP Sciences.

12. Dilasari, B., Toynbee, M.I., **Chaerun, S.K.**, 2024. Biocorrosion of 5083 aluminium alloy by *Citrobacter freundii* SKC-4 in seawater. In E3S Web of Conferences (Vol. 543, p. 03004). EDP Sciences.
13. **Chaerun, S.K.**, Jeremy, E., Chaerun, R. I., Fathira, R. L., Toynbee, M. I., Supandi, S., & Sato, T. (2023). Coal mine wastes: Effective mitigation of coal waste slurry and acid mine drainage through bioflocculation using mixotrophic bacteria as bioflocculants. *International Journal of Coal Geology*, 279, 104370. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104370>
14. **Chaerun, S.K.**, Winarko, R., & Yushandiana, F. (2023). Biohydrometallurgy: Paving the way for a greener future of mineral processing in Indonesia - A mini review. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 5(1), 299-307. <https://doi.org/10.5614/crbb.2023.5.1/8KIZ3AOE>
15. **Chaerun S.K.**, Rizki I.N., Hartomo W.A., Widyanto B. (2023) Biocorrosion behavior of carbon steels by tropical microbes in the presence of corrosion-inhibiting bacterium. *Hayati Journal of Biosciences*, 30(1), 1-16. <https://doi.org/10.4308/hjb.30.1.1-16>
16. **Chaerun, S.K.**, Prabowo, B.A., & Winarko, R. (2022). Bionanotechnology: the formation of copper nanoparticles assisted by biological agents and their applications as antimicrobial and antiviral agents. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100703. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100703>
17. Deviany, D., & **Chaerun, S.K.** (2022) Marine Biosurfactants Combined with Nanomaterials for Potential Oil Spill Remediation. In *Marine Surfactants: Preparations and Applications*. CRC Press (Book Chapter) <https://doi.org/10.1201/9781003307464>
18. **Chaerun, S.K.**, Winarko, R., & Butarbutar, P.P. (2022). Selective Dissolution of Magnesium from Ferronickel Slag by Sulfur-Oxidizing Mixotrophic Bacteria at Room Temperature. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8, 1014–1025. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00536-6>
19. Sanwani E., Jeremy E., **Chaerun S.K.**, Mufakhir F.R., Astuti W. (2022) Use of mixotrophic bacteria as flocculating agents to separate iron from red mud (alumina refinery residue). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8(1), 443-457. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00479-4>
20. Deviany, D. and **Chaerun, S.K.**, 2022. Bioaugmentation of Municipal Waste: Recycling of Electronic Wastes through Biohydrometallurgical Technology. In *Bioaugmentation Techniques and Applications in*

- Remediation (pp. 137-146), Eds: Inamuddin, Adetunji C.O., Ahamed M.I., Altalhi T.A. CRC Press, (Book Chapter).
21. Sanwani E., **Chaerun S.K.**, Husni H., Pamungkas T., Rasyid M.A. (2021). A biosurfactant-producing and iron-oxidizing mixotrophic bacterium as an environmentally friendly reagent for eco-green flotation of Indonesian complex Pb-Zn ores. *Minerals Engineering*, 170, 106824. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106824>
 22. Sanwani E., **Chaerun S.K.**, Husni H., Rasyid M.A. (2021). Surface modification of galena concentrate, sphalerite concentrate and silica by the bacterium *Citrobacter* sp. and its application to green flotation of complex Pb-Zn ores. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3), 1265-1279. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00399-3>
 23. **Chaerun S.K.**, Syarif R., Wattimena R.K. (2020). Bacteria incorporated with calcium lactate pentahydrate to improve the concrete properties and self-healing occurrence. *Nature Scientific Reports*, 10,17873 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74127-4>
 24. **Chaerun S.K.**, Putri E.A., Mubarok M.Z. (2020). Bioleaching of Indonesian galena concentrate with an iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium at room temperature. *Frontiers in Microbiology*, 11, 557548. doi: 10.3389/fmicb.2020.557548
 25. **Chaerun S.K.**, Rahayu S., Rizki I.N., Pane I. (2020). Utilization of a New Locally Isolated Bacterial Strain for Promoting Mechanical Properties of Mortar. *International Journal of Civil Engineering*, 18, 665–671. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00500-z>
 26. Sanwani, E., Lamandhi, N. B., Husni, H., **Chaerun, S. K.**, Astuti, W., & Mufakhir, F. R. (2020). Influence of indigenous mixotrophic bacteria on pyrite surface chemistry: Implications for bioflotation. *Microbiology Indonesia*, 14(1), 1-6. <https://doi.org/10.5454/mi.14.1.1>
 27. Wahyuningsih T., **Chaerun S.K.**, Sanwani E. (2020). Characterization of interaction of biosurfactant-producing bacteria with pyrite minerals as an alternative to depressant reagents in the bioflotation process of copper sulfide minerals that are more environmentally friendly. *AIP Conference Proceedings* 2245, 080005. <https://doi.org/10.1063/5.0007195>
 28. Arifin M., Sanwani E., **Chaerun S.K.** (2020). Removal of sulfur and ash from Indonesian coal by indigenous mixotrophic bacteria. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 1(2), 71-76. <https://crbb-journal.com/ojs/index.php/crbb/issue/view/1>

29. Widyanto B., **Chaerun S.K.**, Hartomo W.A., Rizki I.N. (2019). Biocorrosion Behavior of AISI 1006 Carbon Steel Protected by Biofilm of *Bacillus subtilis* by an Iron-Oxidizing Bacterium and a Sulfate-Reducing Bacterium. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 6, 6. <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0301-1>
30. **Chaerun, S.K.** Anugrah, N., Minwal, W. P., Ichlas, Z. T., & Mubarok, M. Z. (2019). Bacterial pretreatment for the recovery of gold from gold-bearing clays and carbonate minerals using iron- and sulfur oxidizing mixotrophic bacteria. *Proceedings of the 23rd International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2019)*, Fukuoka, Japan.
31. **Chaerun, S. K.**, Putri, F. Y., Minwal, W. P., Ichlas, Z. T., & Mubarok, M. Z. (2019). Extraction of copper (Cu) from low-grade complex copper ores using biosurfactant-producing bacteria. *Proceedings of the 23rd International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2019)*, Fukuoka, Japan.
32. Syarif R., Rizki I.N., Wattimena R.K., **Chaerun S.K.** (2019). Selection of bacteria inducing calcium carbonate precipitation for self-healing concrete application. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 1(1), 26-30. <https://crbb-journal.com/volume-1-issue-1/original-research-4/>
33. Nurhawaisyah S.R., Sanwani E., **Chaerun S.K.** (2019). Clean coal technology using an iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 478 (1), 012023. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/478/1/012023/meta>
34. Nurhawaisyah S.R., Sanwani E., **Chaerun S.K.** (2019). Screening of bacteria for coal beneficiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 478 (1), 012021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/478/1/012021/meta>
35. Purnomo I., **Chaerun S.K.**, Mubarok M.Z. (2019). Biooxidation pretreatment of low-grade refractory gold tailings using a sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 478 (1), 012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/478/1/012020/meta>
36. **Chaerun, S.K.**, Putri, F.Y., Minwal, W. P., Ichlas, Z. T., & Mubarok, M. Z. (2018). Bacterial leaching of an Indonesian complex copper sulfide ore

- using an iron-oxidizing indigenous bacterium. *Microbiology Indonesia*, 12(1), 1-6. DOI: [10.5454/mi.12.1](https://doi.org/10.5454/mi.12.1).
37. Wahyuningsih T., Sanwani E., **Chaerun S.K.** (2018). Potensi bakteri penghasil biosurfaktan sebagai frothing agent pada proses konsentrasi flotasi. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, Vol. 4, No. 1, Maret-Agustus, pp. 207-212. <http://eprints.upnyk.ac.id/16141/>
 38. Wahyuningsih T., Sanwani E., **Chaerun S.K.** (2017). Bioflotasi bijih tembaga: Kadar meningkat tanpa reagen kimia (aplikasi bakteri mixotrof pengoksidasi sulfur). *Prosiding SEMNAS XII 2017, Seminar Nasional Kebumihan XII, Fakultas Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta*, pp. 523-528. <http://eprints.upnyk.ac.id/16135/>
 39. **Chaerun, S.K.**, Putri, F. Y., Mubarak, M. Z., Minwal, W. P., & Ichlas, Z. T. (2017). Bioleaching of supergene porphyry copper ores from Sungai Mak Gorontalo of Indonesia by an iron-and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium. *Solid State Phenomena* 262, 20-23. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.20>
 40. Sanwani, E., Mirahati, R.Z., & **Chaerun, S.K.** (2017). Recovery of copper from pyritic copper ores using a biosurfactant-producing mixotrophic bacterium as bioflotation reagent. *Solid State Phenomena* 262, 181-184. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.181>
 41. **Chaerun, S.K.**, Sulisty, R. S., Minwal, W. P., & Mubarak, M. Z. (2017). Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy*, 174, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.08.006>
 42. Handayani, I., Paisal, Y., Soepriyanto, S., & **Chaerun, S.K.** (2017). Biotransformation of organic sulfur in Tondongkura coal from Indonesia by multi-stage bioprocess treatments. *Hydrometallurgy*, 168, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.027>
 43. Mubarak, M. Z., Winarko, R., **Chaerun, S. K.**, Rizki, I. N., & Ichlas, Z. T. (2017). Improving gold recovery from refractory gold ores through biooxidation using iron-sulfur-oxidizing/sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria. *Hydrometallurgy*, 168, 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.018>
 44. Sanwani, E., Hidayati, D., & **Chaerun, S.K.** (2016). Utilization of the bacteria *Bacillus pumilus* and *Citrobacter youngae* as flotation

- bioreagents in the microflotation of chalcopyrite, pyrite, and silica. *Microbiology Indonesia*, 10(1), 15-22. <https://doi.org/10.5454/mi.10.1.3>
45. Mubarok, M. Z., Pratama, B. E., & **Chaerun, S.K.** (2016). Bioleaching nikel dari bijih limonit pulau gag menggunakan bakteri mixotrof. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 12(1), 69-79. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol12.No1.2016.232>
 46. Sanwani, E., **Chaerun, S.K.**, Mirahati, R., & Wahyuningsih, T. (2016). Bioflotation: bacteria-mineral interaction for eco-friendly and sustainable mineral processing. *Procedia Chemistry*, 19, 666-672. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.068>
 47. Winarko R., Frideni Y.P., **Chaerun S.K.**, Mubarok M.Z. (2016). Prospek pengembangan biohidrometalurgi untuk pengolahan mineral yang ramah lingkungan and berkelanjutan di Indonesia. *Proceedings of TPT XXV PERHAPI*, pp. 175-182.
 48. Sanwani, E., Mirahati, R. Z., & **Chaerun, S.K.** (2015). Possible role of the biosurfactant-producing-and Fe-S-oxidizing bacterium in silicate and sulfide bioflotation processes. *Advanced Materials Research*, 1130, 493-498.
 49. Sanwani, E., Wahyuningsih, T., & **Chaerun, S.K.** (2015). Assessment of surface properties of silica-bacterial cell complex: a potential application for silicate bioflotation processes. *Advanced Materials Research*, 1130, 515-518.
 50. Handayani, I., Paisal, Y., **Chaerun, S.K.** and Soepriyanto, S., 2015. FTIR analysis on organic sulfur distribution: aliphatic mercaptans in lignite, prior and after multistage artificial biotreatment process. *Advanced Materials Research*, 1130, pp.503-506.
 51. Paisal, Y., Handayani, I., **Chaerun, S.K.** and Soepriyanto, S., 2015. Organic Sulfur Reduction on Lignite Coal Using Multistage Artificial Biotreatment (A-Bmt). *Advanced Materials Research*, 1130, pp.524-528.
 52. Sanwani E., Mirahati R.Z., **Chaerun S.K.** (2015). Bioflotation as a clean technology in mineral processing: experimental study of pyrite minerals. *Proceedings of TEKMIIRA Colloquium 2015*, Bandung, Indonesia, November 3-4, 2015, ISBN: 978-979-8641-93-0, pp 19-25.
 53. Sanwani E., Wahyuningsih T., **Chaerun S.K.** (2015). A biosurfactant-producing- and sulfur-oxidizing bacterium: its potential as eco-friendly bioreagents for bioflotation processes. *Proceedings of TEKMIIRA*

- Colloquium 2015, Bandung, Indonesia, November 3-4, 2015, ISBN: 978-979-8641-93-0, pp 97-103.
54. Sanwani E., Mirahati R.Z., **Chaerun SK.** (2015). Changes in surface chemical properties of pyrite caused by a biosurfactant-producing bacterium: Implications for eco-friendly bioflotation reagents in sulfide mineral processing. Proceeding of the 14th International Conference on QIR (Quality in Research), Lombok, Indonesia, 10-13 August 2015, pp. 1014-1018. ISSN: 1411-1284
 55. **Chaerun SK,** Hung S, Mubarok MZ, Sanwani E. (2015). Isolation and phylogenetic characterization of iron-sulfur-oxidizing heterotrophic bacteria indigenous to nickel laterite ores of Sulawesi, Indonesia: Implications for biohydrometallurgy. AIP Conference Proceedings, the 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2014), Vol. 1677, pp. 110001-1 - 110001-4.
 56. Winarko R., Mubarok M.Z., Rizki I.N., **Chaerun S.K.** (2015). Biooxidation of carbonaceous refractory gold ores by an iron-sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium at neutral pH. Advanced Materials Research, 1130, 440-444.
 57. Mubarok M.Z., Sulisty R.S., **Chaerun S.K.** (2015). Minwal W.P. Organic Acid Biogenesis by *Aspergillus niger* and Its Utilization for Indirect Bioleaching of Nickel Laterite Ore. Advanced Materials Research, 1130, 273-277.
 58. Hernahadini N, Suhandono S, Choesin DN, **Chaerun SK,** Kadarusman A. (2014). Isolation, identification and characterization of indigenous fungi for bioremediation of hexavalent chromium, nickel and cobalt. AIP Conference Proceedings, the 4th International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2012), Bandung, Indonesia, November 8-9, 2012, Vol. 1589, pp. 350-354.
 59. Mubarok M.Z., Kusuma H., Minwal W.P., **Chaerun S.K.** (2013). Effects of several parameters on nickel extraction from laterite ore by direct bioleaching using *Aspergillus niger* and acid rock drainage from coal mine as an organic substrate. Advanced Materials Research, 825, 356-359.
 60. Mubarok M.Z., Astuti W., **Chaerun S.K.** (2013). Effects of individual use, mixed culture and sulfur addition on the effectiveness of nickel laterite ore bioleaching with *Penicillium verruculosum* and *Galactomyces geotrichum*. Advanced Materials Research, 825, 380-383.

61. **Chaerun SK**, Tazaki K, Okuno M. (2013). Montmorillonite mitigates the toxic effect of heavy oil on hydrocarbon-degrading bacterial growth: implications for marine oil spill bioremediation. *Clay Minerals*, 48, pp. 639-654. <https://doi.org/10.1180/claymin.2013.048.4.17>
62. **Chaerun SK**, Hasni S, Sanwani E, Moeis MR. (2012). Mercury (Hg)-resistant bacteria in Hg-polluted gold mine sites of Bandung, West Java Province, Indonesia. *Microbiology Indonesia*, Vol. 6, No. 2. pp. 57-68.
63. **Chaerun SK**. (2012). The Nakhodka oil spill and its bioremediation. *Journal of Life Sciences and Technology*, Vol 1, No. 1. pp. 29-33.
64. Parnidi, Rizkita R.E., Leonita S, **Chaerun S.K.**, Nyoman P.A. (2012). The Potential of *Bacillus Cereus* Biofertilizer Sediment Based to Growth Response and Productivity of Paddy Rice (*Oryza sativa*) CV. Situ Bagendit. *Agric: Jurnal Ilmu Pertanian*. Vol. 24, no. 1, p.45-51. <https://repository.uksw.edu/handle/123456789/3502>
65. Mubarok MZ, Astuti W, **Chaerun SK**. (2012). Leaching behaviour of nickel from Indonesian laterite ore in some organic acids. *Proceedings of the XIII International Mineral Processing Symposium, Bodrum, Turkey, October 10-12, 2012*, pp. 523-532.
66. **Chaerun SK**, Pangesti NPD, Toyota K, Whitman WB. (2011). Changes in microbial functional diversity and activity in paddy soils irrigated with industrial wastewaters in Bandung, West Java Province, Indonesia. *Water, Air & Soil Pollution*, Vol. 217, No. 1-4. pp. 491-502. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0603-x>
67. Mubarok MZ, Astuti W, **Chaerun SK**. (2011). Fungal bioleaching of nickel from Indonesian low grade limonitic ore. *Proceedings of the 19th International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2011), Changsha, Hunan Province, China, September 18-22, 2011*, pp. 671-676.
68. Astuti W., Mubarok M.Z., **Chaerun S.K.** (2011). "Prospek Fungal Bioleaching untuk Pengolahan Bijih Nikel Laterit di Indonesia". *Prosiding Seminar Material Metalurgi 2011, Puspiptek LIPI Serpong, 3 November 2011*, pp. 141-149.
69. Altung SA, **Chaerun SK**. (2011). Bacterial bioleaching of sulfide mineral ores by mixotrophic bacterial consortia. *Proceedings of the 3rd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2010), Bandung, Indonesia, November 23-25, 2010*, pp. 362-371.
70. Hartomo WA, Rizki IN, Widyanto B, **Chaerun SK**. (2011). Microbiologically influenced corrosion (MIC) of AISI 1006 carbon steel

- by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Desulvofibrio piger*. Proceedings of the 3rd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2010), Bandung, Indonesia, November 23-25, 2010, pp. 895-905.
71. **Chaerun SK**, Pangesti NPD, Jumiarni D, Aryantha INP, Toyota K, Okuno M. (2010). Biogeochemical characterization of sediments from three largest dam reservoirs (Saguling, Cirata, Jatiluhur) in West Java Province, Indonesia. Proceedings of the 8th International Symposium on Southeast Asian Water Environment, Phuket, Thailand, October 24-26, 2010, pp.169-182.
 72. **Chaerun SK**. (2009). Application of an integrated microbiological, physicochemical and mineralogical approach for the successful bioremediation of contaminated soils. Proceedings of International Conference on Sustainable Development for Water and Wastewater Treatment, Yogyakarta, Indonesia, December 14-15, 2009, pp.315-328.
 73. **Chaerun SK**, Toyota K, Okuno M, Ellerbrock R, Whitman WB. (2009). Physicochemical, mineralogical and microbiological characterization of agricultural soils polluted by industrial wastewaters in Bandung, West Java Province, Indonesia. Proceedings of the 7th International Symposium on Southeast Asian Water Environment, pp.48-55, Asian Institute of Technology Conference Center, Thailand, 28-30 October 2009.
 74. **Chaerun SK**, Whitman WB, Wirth S, Ellerbrock R. (2009). Chemical and mineralogical characterization of agricultural soils inundated by the 26 December 2004 during intrinsic bioremediation in Banda Aceh, Sumatra Island, Indonesia. Proceedings of the 26th Annual American Society of Mining and Reclamation Meeting and 11th Billing Land Reclamation Symposium, pp. 210-225, Billings, Montana, USA, 30 May-5 June 2009.
 75. **Chaerun SK**. (2009). Physicochemical characterization of paddy soils contaminated with industrial wastewaters; implications for bioremediation. Jurnal Purifikasi, Vol. 10, No. 2. pp. 101-108. <https://doi.org/10.12962/j25983806.v10.i2.169>
 76. **Chaerun SK**. (2009). Tempeh waste as a natural, economical carbon and nutrient source: ED-XRF and NCS study. HAYATI Journal of Biosciences, Vol. 16, No. 3, pp. 120-122. <https://doi.org/10.4308/hjb.16.3.120>
 77. **Chaerun SK**. (2008). Decolorization of reactive azo dyestuff pollutant from textile industrial effluent using an aerobic combined treatment

- with bacteria and activated carbon. *Jurnal Teknologi Proses*, Vol. 7, No. 1, pp. 57-67.
78. Jumiarni D., **Chaerun S.K.**, Aryantha I.N.P., Sato T. (2008). Sediments from three largest dam reservoirs (Saguling, Cirata, Jatiluhur) in West Java Province, Indonesia as natural biomineral fertilizers: an agricultural implication. The 2nd USM Penang International Postgraduate Convention, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, 18th-20th June 2008.
 79. Tazaki K, Nomura M, Morii I, Satoh K, Baba N, Nakanishi T, Yokoyama A, **Chaerun SK**. (2008). Variation of atmospheric and ground fissure radon concentration using portable natural gamma ray system while the Niigata Prefecture Chuetsu-Oki Earthquake in 2007. *Earth Science*, Vol. 62, pp. 325-330. https://www.jstage.jst.go.jp/article/agcjchikyukagaku/62/5/62_KJ00005034036/pdf
 80. Tazaki K, **Chaerun SK**. (2008). Life in oil: Hydrocarbon-degrading bacterial mineralization in oil spill-polluted marine environment. *Frontiers of Materials Science in China*, Vol. 2, No. 2, pp. 120-133. <https://doi.org/10.1007/s11706-008-0022-8>
 81. **Chaerun SK**, Asada R, Tazaki K. (2007). Biodegradation of heavy oil from the Nakhodka oil spill by indigenous microbial consortia, *International Journal of Applied Environmental Sciences*. Vol. 2, No. 1, pp. 19-30.
 82. Tazaki K, Shirotori T, **Chaerun SK**. (2007). Radiochemical aspect and biomineralization at hot springs in Japan. *Proceedings of International Workshop on Long-Term Performance of Smectitic Clays Embedding Canisters with Highly Radioactive Waste*, pp. 274-285
 83. **Chaerun SK**. (2007). Quantitative analysis of nitrogen compounds in paddy fields amended with urea fertilizer. *Jurnal Purifikasi*, Vol. 8, No. 1, pp. 85-90. <http://garuda.ristekbrin.go.id/documents/detail/768136>
 84. Tazaki K, Watanabe H, **Chaerun SK**, Shiraki K, Asada R. (2006). Hydrocarbon-degrading bacteria and paraffin from polluted seashores 9 years after the Nakhodka oil spill in the Sea of Japan, *Acta Geologica Sinica*, 80, pp. 432-440. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2006.tb00260.x>
 85. **Chaerun SK**. (2006). Use of X-Ray diffractometry and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy for the study of bacterial cell-oil-clay complexes in oil-polluted seawater. *Proceedings of the 1st International Conference*

- on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2006), pp. 261-264, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, November 29-30, 2006.
86. **Chaerun SK**, Tazaki K. (2005). How kaolinite plays an essential role in remediating oil-polluted seawater. *Clay Minerals*, 40, pp. 481-491. [<https://doi.org/10.1180/0009855054040185>]
 87. **Chaerun SK**, Tazaki K, Asada R, Kogure K. (2005). Interaction between clay minerals and hydrocarbon-utilizing indigenous microorganisms in high concentration of heavy oil: Implications for bioremediation, *Clay Minerals*, 40, pp. 105-114. <https://doi.org/10.1180/0009855054010159>
 88. Tazaki K, Wakimoto R, Minami Y, Yamamoto M, Miyata K, Sato K, Saji I, **Chaerun SK**, Zhou G, Morishita T, Asada R, Segawa H, Imanishi H, Kato R, Otani Y, Watanabe T. (2004). Transport of carbon-bearing dusts from Iraq to Japan during Iraq's war, *Atmospheric Environment*, 38, pp. 2091-2109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.028>
 89. **Chaerun SK**, Tazaki K, Asada R, Kogure K. (2004). Bioremediation of coastal areas 5 years after the Nakhodka oil spill in the Sea of Japan: isolation and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria, *Environment International*, 30, pp. 911-922. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.007>
 90. **Chaerun SK**, Tazaki K, Asada R, Kogure K. (2004). Alkane-degrading bacteria and heavy metals from the Nakhodka oil spill-polluted seashores in the Sea of Japan after five years of bioremediation, *The Science Reports of Kanazawa University*, v. 49, no. 1,2, pp. 25-46. <https://ci.nii.ac.jp/naid/120000812043>
 91. Tazaki K, Morikawa T, **Chaerun SK**, Belkova NL, Okuno M, Asada R, Nishikawa O. (2004). Microbial controls on As-mineralogy in pH 7~8 natural solutions, *Laguna*, 11, pp. 1-15.
 92. **Chaerun SK**, Tazaki K, Asada R. (2003). Double function of bentonite and kaolinite as adsorbents and "microbial growth-support media" for degradation of crude oil, In: Tazaki, K. (ed.), *Heavy Oil Spilled from Russian Tanker "Nakhodka" in 1997: Towards Eco-responsibility*, Earth Sense. 21st Century COE Kanazawa University, Kanazawa University Press, Kanazawa, Japan, pp. 253-277. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10013036086/>
 93. Asada R, Tanaka Y, **Chaerun SK**, Tazaki K. (2003). Bioremediation of oil contaminated soils -cultivation experiments using an oil adsorption-resolution item "sponge"-, In: Tazaki, K. (ed.), *Heavy Oil Spilled from*

- Russian Tanker “Nakhodka” in 1997: Towards Eco-responsibility, Earth Sense. 21st Century COE Kanazawa University, Kanazawa University Press, Kanazawa, Japan, p. 337-351.
<https://ci.nii.ac.jp/naid/10024858755/>
94. **Chaerun SK**, Tazaki K. (2003). Hydrocarbon-degrading bacteria in the heavy oil polluted soil and seawater after 5 years of bioremediation, In: Tazaki, K. (ed.), Water and Soil Environments: Microorganisms play an important role. 21st century COE Kanazawa University, Kanazawa University Press, Kanazawa, Japan, pp. 187-204.
<http://hdl.handle.net/2297/5991>
 95. Watanabe H, Tazaki K, Islam ABMR, **Chaerun SK**. (2003) Copper biomineralization with banded structure at Dogamaru mine, Shimane Prefecture, Japan, In: Tazaki, K. (ed.), Water and Soil Environments: Microorganisms play an important role. 21st century COE Kanazawa University, Kanazawa University Press, Kanazawa, Japan, pp. 91-140.
 96. **Chaerun SK**, Tazaki K, Asada R. (2003). Perlite rocks as a beneficial material in heavy oil bioremediation. In: Tazaki, K. (ed.), Water and Soil Environments: Biological and Geological Perspectives. 21st Century COE Kanazawa University, Kanazawa University Press, Kanazawa, Japan, pp. 290-293.
 97. **Chaerun SK**, Tazaki K. (2003). Effect of kaolinite on microbial growth in high concentration of heavy oil, Clay Science, vol. 12, no. 3, pp. 187-196.
<https://doi.org/10.11362/jcssjclayscience1960.12.187>
 98. Tazaki K, Okrugin V, Okuno M, Belkova N, Islam ABMR, **Chaerun SK**, Wakimoto R, Sato K, Moriichi S. (2003). Heavy metallic concentration in microbial mats found at hydrothermal systems, Kamchatka, Russia, The Science Reports of Kanazawa University, 47, pp. 1- 48.
<https://ci.nii.ac.jp/naid/110001071835/>
 99. Tazaki K, Kunimine Y, Morikawa T, **Chaerun SK**, Asada R, Miyata K, Wakimoto R, Ikeda Y, Sato K, Segawa H, Koji N, Fujisawa A, Moriichi S. (2003). Characteristics of flushed dam sediments with dark sludge from Dashidaira Dam, Toyama, Japan, Laguna, 10, p.1-17 (In Japanese with English abstract). <https://doi.org/10.11362/jcssjnendokagaku1961.46.46>
 100. **Chaerun SK**, Tazaki K, Asada R. (2002). Microbial activities of hydrocarbon-degrading bacteria in the heavy oil contaminated soil and seawater after 5 years of bioremediation, Memoirs of Division of Global Environmental Science and Engineering, Graduate School of Natural

VII. PENGHARGAAN

1. **IMC16/IFSM Award for Young Scientist** in Electron Microscopy from the Kazato Research Foundation (JEOL Group) (2006).
2. **Best Poster Award** in the 4th Life Sciences Postgraduate Conference on presented paper entitled "Chemical and mineralogical characterization of sediments from three largest dam reservoirs (Saguling, Cirata, Jatiluhur) in West Java Province, Indonesia" given by the organizing committee of the 2nd USM Penang International Postgraduate Convention 2008, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, June 18-20, 2008.
3. **Best Oral Presenter Award** in Material Sciences on presented paper entitled "Microbiologically influenced corrosion (MIC) of AISI 1006 carbon steel by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Desulfovibrio piger*" given by the organizing committee of the 3rd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2010), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, November 23-25, 2010.
4. **Best Poster Award** in Environmental Science on presented paper entitled "Isolation and characterization of mercury (Hg)-resistant bacteria from Hg-contaminated minerals and sediments of the Bunikasih Gold Mine, West Java Province, Indonesia" given by the organizing committee of the 3rd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2010), Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, November 23-25, 2010.
5. **Best Poster Award** in Microbiology, Genetics and Molecular Biology on presented paper entitled "Isolation, characterization and molecular phylogenetic analysis of arsenic (As)-resistant bacteria from As-rich microbial mats at the White Crater, West Java Province, Indonesia" given by the organizing committee of the 1st Joint Symposium of ITB and USM (IJSIU 2010), Bandung, Indonesia, December 20-21, 2010.
6. **Best Poster Award** on presented paper entitled "Assessment of surface properties of silica-bacterial cell complex: a potential application for silicate bioflotation processes" given by the International Society of Biohydrometallurgy at the 21st International Biohydrometallurgy Symposium (IBS 2015), Bali, Indonesia, October 5-9, 2015.

7. **Best Poster Award** on presented paper entitled "A biosurfactant-producing and sulfur-oxidizing bacterium: its potential as eco-friendly bioreagents for bioflotation processes" given by the organizing committee of Colloquium R&D Centre for Mineral and Coal Technology (TEKMIRA) 2015, Bandung, Indonesia, November 3-4, 2015.
8. **Best Paper Award** on manuscript competition entitled "Utilization of the bacteria *Bacillus pumilus* and *Citrobacter youngae* as flotation bioreagents in the microflotation of chalcopyrite, pyrite and silica" on Writing Clinic Microbiology Indonesia, organized by BBRC ITB and Indonesian Society for Microbiology, May 28, 2016, Bandung, Indonesia.
9. **Best Paper Award** on presented paper entitled "Screening of bacteria for silica bioflocculation" given by the organizing committee of International Process Metallurgy Conference 2016, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, November 10-11, 2016.
10. **Best Paper Award** on presented paper entitled "Biooxidation pretreatment of refractory sulfidic gold concentrates using iron- and sulfur-oxidizing bacteria" given by the organizing committee of International Process Metallurgy Conference 2016, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, November 10-11, 2016.
11. **The Best Researcher Award** given by Biosciences and Biotechnology Research Center (BBRC), Institut Teknologi Bandung, 2016
12. **The Best Researcher Award** given by Biosciences and Biotechnology Research Center (BBRC), Institut Teknologi Bandung, 2017
13. **First winner** on competition of TMLEnergy Green Challenges with a theme of management of AMD/ARD containing high concentration of total suspended solid (TSS) and its scale-up for coal industrial application, PT TMLEnergy & PT MA/BDMS Baramulti Group, August 2018.
14. **An Innovative and Inspiring Lecturer Award** for Distinguished Undergraduate Teaching given by ITB and PT Paragon Technology and Innovation, 13 October 2018.
15. **An ITB Innovator Award** for excellence in research and innovation in the field of energy and environment given by ITB, 1 October 2019
16. **A 10-year Satyalancana Award:** Indonesia Presidential Award for a 10-year service excellence as government employee, 17 August 2019.
17. **First winner** on Ideation competition 2019 with a category of effective and cost-efficient technology in solving problems in coal mining industry, PT MA/BDMS Baramulti Group, November 2019.

18. **An ITB Award** for excellence in research and innovation given by President of ITB, 2 March 2020.
19. **An BIGMIND Innovation Award for Implementation category (First winner) entitled** “Inovasi *green technology* pemanfaatan *red mud* (produk samping pemurnian alumina) sebagai sumber besi (Fe) dengan metode bioflokulasi” by the MIND ID Mining Industry Indonesia, November 2022.
20. **Silver Winner** Anugerah Kelembagaan Kategori Perguruan Tinggi Pelaksana ISS-MBKM Terbaik PKKM 2022 Liga 1 dari Kemendikbudristek entitled “Pembuatan *Bio-coal* Menggunakan Mikroba sebagai Bahan Bakar Alternatif yang Murah dan Ramah Lingkungan dari Pengelolaan dan Pemanfaatan Sampah Domestik di Desa Rancaekek Wetan, Kabupaten Bandung”.
21. **Best Poster Award (The first Winner)** on presented paper entitled "Enhancing Carbon Capture and Storage (CCS) Using *Pseudomonas*-Derived Carbonic Anhydrase as a Catalyst: Leveraging Pregnant Leach Solution (PLS) from Steel Slag Bioleaching as a Calcium Source" given by the organizing committee of International Process Metallurgy Conference 2023, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, September 12-13, 2023.

VIII. PATEN

Granted Patents

1. **IDP000069926:** *Bioleaching* tembaga sulfida dengan menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi sulfur di dalam tangki berpengaduk [[In English: Bioleaching of copper sulfides using sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria in stirred tank](#)].
2. **IDP000073962:** Metode biooksidasi dalam pra-pengolahan bijih emas yang refraktori menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi besi [[In English: Biooxidation pretreatment of refractory gold ores using iron-oxidizing mixotrophic bacteria](#)].
3. **IDP000073841:** Proses bioflokulasi mineral silika (SiO₂) menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi besi sebagai bioflokulan [[In English: Bioflocculation process of silica \(SiO₂\) using iron-oxidizing mixotrophic bacteria as bioflocculants](#)].
4. **IDP000089889:** Proses ekstraksi magnesium dari terak peleburan feronikel menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi besi [[In English:](#)

Magnesium extraction process from ferronickel slags using iron-oxidizing mixotrophic bacteria].

Registered Patents

1. **P00201902089:** Proses ekstraksi tembaga dari bijih tembaga sulfida dalam tangki pengaduk menggunakan bakteri *Alicyclobacillus ferrooxydans* strain SKC/SAA-2 [In English: Copper extraction process from copper sulfide ores in stirred tank using the bacterium *Alicyclobacillus ferrooxydans* strain SKC/SAA-2].
2. **P00201905145:** Produk bakteri *Alicyclobacillus ferrooxydans* dan komposisi mediumnya serta metode untuk bioleaching Zn dari bijih Pb-Zn kompleks menggunakan komposisi medium bakteri *Alicyclobacillus ferrooxydans* [In English: Product of the bacterium *Alicyclobacillus ferrooxydans* and its growth medium composition and method for Zn bioleaching from complex Pb-Zn ores using the growth medium composition of the bacterium *Alicyclobacillus ferrooxydans*].
3. **S00201912002:** Komposisi media pertumbuhan bakteri bioflokulan dari limbah industri [In English: Growth medium composition of biofloculants-producing bacteria originating from industrial wastes].
4. **P00201912008:** Produk bakteri *Bacillus pumilus* dan metode penggunaannya untuk *bioleaching* mineral silikat [In English: Product of the bacterium *Bacillus pumilus* and method of its use for bioleaching silicates].
5. **P00201912009:** Produk bakteri *Pseudomonas hunanensis* yang memiliki kemampuan sebagai bioflokulan dan agen bioremediasi air asam tambang (AAT) [In English: Product of the bacterium *Pseudomonas hunanensis* capable of being biofloculants and agents of acid mine drainage (AMD) bioremediation].
6. **P00201912006:** Proses ekstraksi timbal dari bijih Pb-Zn kompleks menggunakan bakteri mixotrof pengoksidasi besi dalam medium SKC-broth [In English: Lead extraction process from complex Pb-Zn ores using iron-oxidizing mixotrophic bacteria in SKC-broth medium].
7. **P00201912004:** Bioreaktor untuk pengolahan air asam tambang dan limbah yang mengandung padatan tersuspensi [In English: Bioreactor for treatment of acid mine drainage (AMD) and wastewater containing suspended solid].

8. **S00202312897:** Proses ekstraksi tembaga dari bijih tembaga kompleks menggunakan konsorsium bakteri mixotrof sebagai pengoksidasi besi dan sulfur dengan penambahan pirit, sulfur, dan NaCl.
9. **S00202310313:** Proses pembuatan bioflokulan menggunakan bakteri *Bacillus aryabhatai* strain SKC-9 yang dapat mengendapkan limbah TSS.
10. **S00202312909:** Proses ekstraksi silikon dari terak peleburan feronikel menggunakan bakteri mixotrof *Bacillus nitratreducens* strain SKC-2a sebagai pengoksidasi besi.
11. **S00202312938:** Proses pengolahan batubara menggunakan bakteri mixotrof *Citrobacter freundii* SKC-4 sebagai pengoksidasi sulfur untuk mengurangi kadar sulfur dan abu.
12. **S00202312947:** Proses pengolahan bijih emas refraktori menggunakan bakteri *Comamonas thiooxydans* strain SKC/SAA-1 sebagai pengoksidasi sulfur untuk meningkatkan nilai ekstraksi emas.
13. **S00202310314:** Proses pembuatan bioflokulan menggunakan bakteri *Citrobacter freundii* strain SKC-4 untuk menjernihkan limbah tambang.
14. **S00202310347:** Strain bakteri *Luteococcus sanguinis* SKC/VA-4 sebagai agen bioleaching pb dari konsentrat sphalerite.
15. **S00202310317:** Strain bakteri *Pseudomonas plecoglossicida* SKC/SH-9 sebagai agen biobenefisasi batubara.
16. **S00202310402:** Proses pembuatan nanometal tembaga menggunakan ekstrak tanaman kratom (*Mitragyna speciosa*) untuk lapisan dalam masker.
17. **S00202312965:** Proses pembuatan geopolimer untuk immobilisasi logam toksik timbal (Pb).
18. **S00202312964:** Proses pengolahan batubara menggunakan bakteri *Pseudomonas plecoglossicida* strain SKC/SH-9 sebagai pengoksidasi pirit untuk mengurangi kandungan sulfur dan abu batubara.
19. **S00202310412:** Proses ekstraksi Pb dari konsentrat sphalerite menggunakan bakteri *Luteococcus sanguinis* strain SKC/VA-4.
20. **S00202401071:** Strain bakteri *Pantoea septica* SKC/SAA-3 sebagai bioflokulan serta pemecah mineral karbonat untuk meningkatkan nilai rekovery emas.
21. **S00202401092:** Proses pengolahan bijih emas yang mengandung mineral karbonat menggunakan bakteri *Pantoea septica* strain SKC/SAA-3 untuk meningkatkan nilai rekovery emas.
22. **S00202401098:** Proses pembuatan inhibitor biokorosi menggunakan bakteri *Diaphorobacter nitroreducens* strain SKC/YLP-6.





23. **S00202314086:** Proses pembuatan bioflokulan menggunakan bakteri *Alcaligenes faecalis* subsp. *phenolicus* strain SKC/L-1 untuk menurunkan kekeruhan dan total suspended solid (TSS) limbah tekstil.
24. **S00202401101:** Proses biooksidasi konsentrat emas refraktori sulfida menggunakan bakteri *Priestia aryabhatai* strain SKC-5 dengan penambahan FeSO_4 , FeS_2 , dan molase untuk meningkatkan ekstraksi emas.
25. **S00202314091:** Proses pembuatan bioflokulan menggunakan bakteri *Bacillus velezensis* strain SKC/S-5 untuk menurunkan kekeruhan dan total suspended solid (TSS) air baku PDAM.

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id  [FgbItb](#)  [FGB_ITB](#)
 [@fgbitb_1920](#)  [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-569-9

