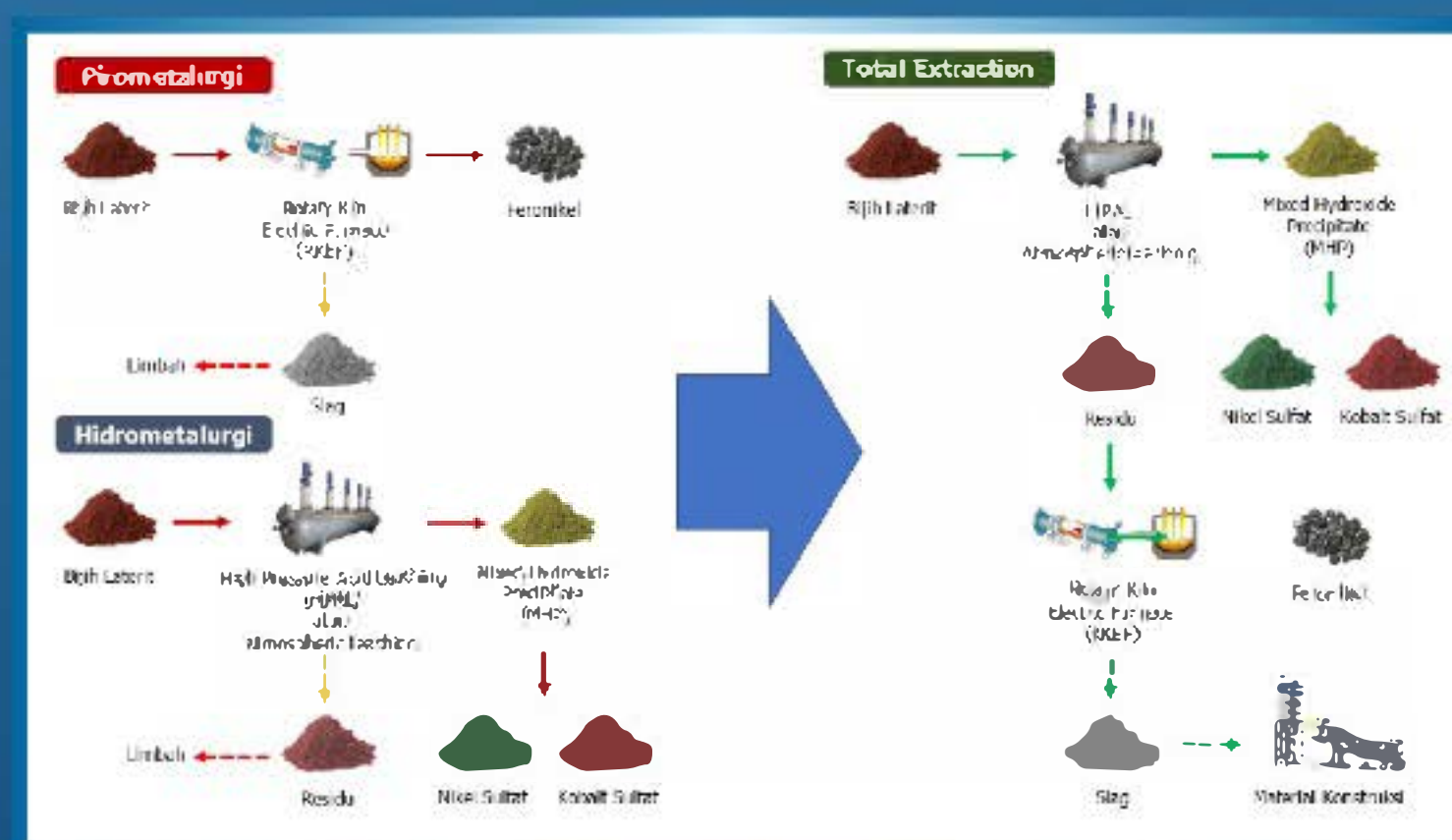


PEMANFAATAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN TUNTAS UNTUK HILIRISASI MINERAL KRITIS INDONESIA YANG BERKELANJUTAN DALAM RANGKA MENDUKUNG PROGRAM TRANSISI ENERGI NASIONAL

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET KEPAKARAN METALURGI PROSES



OLEH:
WIDI ASTUTI

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**PEMANFAATAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN
TUNTAS UNTUK HILIRISASI MINERAL KRITIS
INDONESIA YANG BERKELANJUTAN DALAM
RANGKA MENDUKUNG PROGRAM TRANSISI
ENERGI NASIONAL**

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**PEMANFAATAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN
TUNTAS UNTUK HILIRISASI MINERAL KRITIS
INDONESIA YANG BERKELANJUTAN DALAM
RANGKA MENDUKUNG PROGRAM TRANSISI
ENERGI NASIONAL**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
KEPAKARAN METALURGI PROSES**

**OLEH:
WIDI ASTUTI**

Reviewer:
Prof. Dr. Evvy Kartini
Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rochman, M.Eng.
Prof. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, S.T., M.E., D.Eng.

Penerbit BRIN

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Teknologi Pertambangan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pemanfaatan Teknologi Pengolahan Tuntas untuk Hilirisasi Mineral Kritis Indonesia yang Berkelanjutan dalam Rangka Mendukung Program Transisi Energi Nasional/Widi Astuti– Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

v + 126 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-602-6303-23-3 (*e-book*)

- | | |
|-------------------------------|------------------------|
| 1. Teknologi industri Mineral | 2. Transisi Energi |
| 3. Limbah Industri | 4. Sumber Daya Mineral |

666.8

Copy editor : Nadifa Azzahra Putri
Proofreader : Dyah Arum Kusumastuti
Penata Isi : Dyah Arum Kusumastuti & Hilda Yunita
Desainer Sampul : Dyah Arum Kusumastuti & Hilda Yunita

Edisi pertama : Agustus 2024



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. PERKEMBANGAN HILIRISASI MINERAL KRITIS DI INDONESIA UNTUK PROGRAM TRANSISI ENERGI	15
A. Mineral Kritis untuk Mendukung Transisi Energi	15
B. Industri Pengolahan Mineral Kritis di Indonesia.....	18
C. Teknologi Pengolahan tuntas untuk Pengelolaan Sumber Daya Mineral Kritis yang Berkelanjutan	22
III. PEMANFAATAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN TUNTAS PADA HILIRISASI MINERAL KRITIS INDONESIA	25
A. Pengolahan tuntas dari Sumber Daya Mineral Primer: Bijih Nikel Laterit	25
B. Pengolahan tuntas dari Sisa Hasil Pengolahan (SHP): Abu Terbang Batubara (<i>coal fly ash</i>).....	31
C. Pengolahan tuntas dari Limbah Industri: Katalis Bekas	36
IV. PELUANG DAN TANTANGAN IMPLEMENTASI TEKNOLOGI PENGOLAHAN TUNTAS PADA HILIRISASI MINERAL KRITIS DI INDONESIA	41
V. KESIMPULAN.....	45
VI. PENUTUP.....	47
VII. UCAPAN TERIMA KASIH.....	49
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN.....	63
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	69
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	107

BIODATA RINGKAS



Widi Astuti lahir di Cilacap pada tanggal 19 Agustus 1978, adalah anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Kasiyo dan Ibu Ratna. Menikah dengan Dedi Winarko dan dikaruniai tiga orang anak yaitu Hilman Ganendra Nayottama, Sofia Anindya Maheswari, dan Hadi Pramudya Daneswara.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 38/M Tahun 2023 tanggal 18 September 2023 yang bersangkutan diangkat menjadi Peneliti Ahli Utama terhitung mulai 10 Oktober 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 179/I/HK/2024 tanggal 12 Juli 2024 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset (MPPR), yang bersangkutan dapat melakukan pidato Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri 1 Kalikudi, tahun 1990, Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Maos, tahun 1993, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Cilacap, tahun 1996. Memperoleh gelar Sarjana Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta, tahun 2001, gelar Magister bidang Rekayasa Pertambangan dari Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, tahun 2011, dan

gelar Doktor bidang *Earth Resources Engineering* dari Kyushu University, Jepang, tahun 2015.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain Drafting Paten LIPI di Serpong (2007); Lokakarya Komersialisasi Litbang di Bogor (2008); *Basic XRD Application Course* di Belanda (2017); *JASSO Follow-up Research Fellowship* di Jepang (2017-2018); Bimtek Penulisan Artikel Ilmiah Internasional di Medan (2019); dan Program Riset Non Gelar dalam bentuk *Tailor Made* di NTNU, Norwegia (2021), serta mengikuti Diklatpim Tk. IV oleh Pusbindiklat LIPI di Bogor (2012).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Seksi Penambangan dan Pengolahan Mineral Logam, UPT BPML LIPI (2010-2012), Kepala Seksi Pemanfaatan Teknologi, BPTM LIPI (2016-2017), Kepala Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI (2019-2021), Ketua Kelompok Riset PNT dan Teknoekonomi Mineral dan Batubara (2022), Ketua Kelompok Riset PNT Mineral Logam Tanah Jarang di PR Teknologi Pertambangan BRIN (2023-2024). Serta menjadi ketua tim PME di UPT BPML LIPI dan BPTM LIPI.

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Pertama golongan III/b tahun 2006, Peneliti Muda golongan III/c tahun 2008, Peneliti Muda golongan III/d tahun 2016, Peneliti Madya golongan IV/a tahun 2017, Peneliti Ahli Madya golongan IV/c tahun 2021, dan Peneliti Ahli Utama tahun 2023.

Menghasilkan 162 karya tulis ilmiah (KTI) dan 33 paten baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk jurnal dan prosiding internasional dan nasional, serta paten (7 tersertifikasi dan 26 terdaftar). Sebanyak 130 KTI dalam Bahasa Inggris dan 32 dalam Bahasa Indonesia. Menghasilkan 1 naskah akademik Grand Strategy Komoditas Mineral dan Batubara Tahap II bersama dengan Kementerian ESDM.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti, pembimbing disertasi/tesis/skripsi/internship mahasiswa, dan penguji disertasi (S3) di UGM, UI, UNILA, UNHAS, ITERA, ITK, POLINELA, PEP Bandung, dan POLTEK TN BRIN serta pernah menjadi dosen mata kuliah di ITERA. Selain itu, sebagai Asesor Jabfung Peneliti Pusat dan Instansi (2021-sekarang), sebagai Mentor Latsar CPNS (2022, 2024), sebagai Penelaah Proposal Program RIIM dan Rumah Program ORNM (2022-sekarang), serta Penelaah Proposal DbR BRIN.

Aktif dalam kegiatan penelitian dan kerjasama baik sebagai ketua peneliti maupun anggota pada 56 kegiatan penelitian dan kerjasama baik dari pendanaan internal maupun pendanaan eksternal dan internasional.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, antara lain sebagai anggota HKI (2005-2006), Himpenindo (2019-2022), PPI (2022-sekarang), OWSD (2021-sekarang), anggota serta pengurus Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia (Prometindo) (2021-sekarang), tim editor Jurnal Rekayasa Proses (2023-sekarang), dan mitra bestari pada beberapa jurnal nasional dan internasional.

Menerima penghargaan Peneliti Terbaik LIPI Tahun 2012, Satyalancana Karya Satya X (tahun 2013), Finalis L'oreal FWIS (tahun 2016), JASSO Follow-up Research Fellowship (tahun 2017) dari JASSO, Satyalancana Karya Satya XX (tahun 2023), Periset Berkinerja Tinggi BRIN Tahun 2023 dari Kepala BRIN, Ketua Kelompok Riset Terbaik Tahun 2023 di Kepala ORNM, dan Fulbright Visiting Scholar Tahun 2024 dari Fulbright-AMINEF.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrohmaanirraahim.

Assalaamu 'alaykum warrahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia, dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan p–uji dan Syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya, sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 14 Agustus 2024, menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

PEMANFAATAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN TUNTAS UNTUK HILIRISASI MINERAL KRITIS INDONESIA YANG BERKELANJUTAN DALAM RANGKA Mendukung PROGRAM TRANSISI ENERGI NASIONAL

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* tentang perkembangan, peluang, dan tantangan hilirisasi mineral yang

berkelanjutan di Indonesia dalam rangka mendukung program transisi energi nasional serta program strategis nasional lainnya yang membutuhkan logam-logam dan mineral kritis yang beragam dan terus meningkat kapasitasnya. Penemuan-penemuan tersebut dapat memberikan pengetahuan dan pemahaman tentang potensi teknologi kunci pengolahan sumber daya mineral Indonesia yang berkelanjutan dengan teknologi pengolahan tuntas

Orasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang teknologi pengolahan tuntas dan peranannya dalam mengantisipasi kehilangan sumber logam dan mineral kritis yang sangat berharga dan bernilai tinggi. Dengan demikian pengelolaan sumber daya mineral yang berkelanjutan dapat diwujudkan, sehingga kebijakan-kebijakan terkait sumber daya mineral kritis juga menjadi tepat sasaran untuk mendukung kemandirian material berbasis kekayaan alam Indonesia.

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah salah satu krisis global yang mengemuka dalam beberapa dekade terakhir, bahkan sejak revolusi industri. Selain perang dan bencana kesehatan (Covid dll), dunia berada di tengah-tengah krisis energi global dengan tingkat keparahan dan kompleksitas yang belum pernah terjadi sebelumnya. Transisi ke energi ramah lingkungan adalah kunci untuk mengatasi perubahan iklim dan menciptakan perekonomian berkelanjutan. Mengatasi perubahan iklim memerlukan upaya bersama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan transisi ke sumber energi berkelanjutan. Terdapat konsensus global yang berkembang bahwa, untuk mencegah skenario iklim terburuk di masa depan dan berupaya membatasi pemanasan global hingga di bawah 2oC dibandingkan suhu pada masa pra-industri, negara-negara industri perlu segera memulai transisi yang ambisius menuju pembangkit listrik rendah karbon, dan elektrifikasi secara simultan di semua sektor yang memerlukan banyak energi, terutama pada sektor transportasi (Kamran et al., 2023).

Tren utama di sektor energi adalah peralihan ke arah elektrifikasi, yang memerlukan sumber daya mineral dalam jumlah besar. Secara umum, teknologi terbarukan lebih banyak menggunakan bahan mineral dibandingkan energi tradisional. Misalnya, memproduksi energi surya dan angin memerlukan sumber daya mineral sekitar sepuluh kali lebih banyak dibandingkan menghasilkan energi dalam jumlah yang sama dari pembangkit listrik tenaga gas alam (Vivoda, 2023). Pembangkit listrik tenaga surya berkapasitas 1 MW membutuhkan tembaga tiga kali lebih banyak dibandingkan pembangkit listrik konvensional. Begitu pula dengan kendaraan listrik (EV) yang membutuhkan input mineral enam kali lebih banyak dibandingkan mobil konvensional (Monirul Islam et al., 2023). Litium, kobalt, dan nikel sangat penting untuk EV dan baterai penyimpan daya. Transisi energi ramah lingkungan sangat bergantung pada sumber daya mineral untuk membangun kapasitas produksi energi terbarukan (Monirul Islam et al., 2023). Oleh karena itu, pasar internasional menunjukkan dinamika permintaan impor mineral yang terus meningkat. Pembangunan ekonomi berkelanjutan di setiap negara sangat bergantung pada ketersediaan bahan mentah, khususnya mineral.

Mineral kritis, yang didefinisikan sebagai mineral penting bagi perekonomian dan keamanan nasional, telah banyak diterapkan dalam transisi energi dan teknologi digital (Yi et al., 2021). Definisi yang digunakan untuk mengkarakterisasi kategori komoditas ini, seperti mineral tanah jarang, mineral tanah kritis, mineral kritis umumnya menyiratkan (1) kepentingan strategis bagi perekonomian nasional atau pengembangan teknologi

dan (2) risiko tinggi yang terkait dengan gangguan pasokan. Oleh karena itu, kumpulan “mineral kritis” dapat bervariasi dari waktu ke waktu dan antar negara (Considine et al., 2023). Misalnya, pada tahun 2022, Survei Geologi Amerika Serikat menambahkan nikel dan seng, sekaligus menghilangkan helium, kalium, renium, dan strontium ke dalam daftar mineral kritis mereka. Pada November 2022, Badan Energi Internasional (IEA) mengidentifikasi 16 negara dengan daftar mineral kritis. Ada banyak variasi dan sedikit konsensus antar negara mengenai elemen strategis atau kritis. Australia, Kanada, Uni Eropa, Finlandia, Jepang, Inggris, dan Amerika Serikat telah menerbitkan strategi mineral kritis atau strategis beserta daftar yang menyertainya (Vivoda, 2023). Mineral kritis diidentifikasi karena pentingnya dalam menciptakan produk-produk strategis berteknologi tinggi, termasuk teknologi energi terbarukan, sistem militer, perangkat elektronik, dan peralatan medis. Mineral juga kritis karena mengandung risiko dan kerentanan rantai pasokan. Rantai pasokan mineral kritis mengacu pada jaringan kompleks proses dan aktivitas yang terlibat dalam produksi, pemrosesan, pengangkutan, dan distribusi mineral tersebut dari sumber hingga pengguna akhir (Vivoda, 2023).

Sebagai salah satu negara dengan kekayaan sumber daya dan cadangan beberapa mineral terbesar di dunia, Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (Kementerian ESDM) telah menetapkan klasifikasi komoditas mineral kritis di Indonesia dalam Kepmen ESDM Nomor 29.K/MB.01/MEM.B/2023 (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2023). Penetapan

jenis komoditas yang tergolong dalam klasifikasi mineral kritis didasarkan atas kriteria: (a) mineral yang menjadi bahan baku dalam industri strategis nasional; (b) mineral yang memiliki nilai manfaat untuk perekonomian nasional dan pertahanan keamanan negara; (c) mineral yang memiliki risiko tinggi terhadap pasokan; dan (d) mineral yang tidak memiliki pengganti yang layak. Komoditas mineral kritis dapat berasal dari sumber primer yaitu dari bahan mineral tambang, maupun dari sumber sekunder baik dari limbah elektronik, limbah industri seperti katalis bekas, sisa hasil pengolahan dan pemurnian di industri pertambangan, abu terbang batubara, dan lain sebagainya.

Dalam rangka ikut serta mengatasi perubahan iklim global, Indonesia juga telah menetapkan target untuk mencapai emisi nol bersih (*net zero emission/NZE*) pada tahun 2060 atau lebih cepat, di antaranya dengan menetapkan Program Transisi Energi Nasional serta Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (*Battery Electric Vehicle/BEV*) yang ditetapkan dalam Perpres No. 55 Tahun 2019. Indonesia telah mempercepat penyelesaian rantai pasokan baterai *BEV end-to-end*, khususnya di sektor hulu berbasis sumber daya mineral kritis yang dimilikinya.

Industri pengolahan mineral di Indonesia telah ada selama beberapa waktu, namun peningkatan permintaan terhadap mineral-mineral tersebut sebenarnya disebabkan oleh transisi energi rendah karbon yang menyebabkan industri ini kembali menonjol. Permintaan akan mineral kritis meningkat pesat seiring dengan peralihan dunia ke arah pembangkitan energi terbarukan dan elektrifikasi sektor transportasi dan manufaktur. Dengan

adanya kebutuhan mendesak untuk mengatasi perubahan iklim dan beralih dari bahan bakar fosil, pasokan mineral kritis yang dapat diandalkan, aman, berketahanan, dan terus meningkat sangatlah penting.

Sejak diterbitkannya Undang-undang (UU) Nomor 4 Tahun 2009 yang direvisi menjadi UU Nomor 3 Tahun 2020 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara, kegiatan hilirisasi mineral di Indonesia semakin meningkat. Pengolahan dan pemurnian mineral memiliki peran penting untuk memenuhi perubahan rantai pasok global, sehingga penting untuk disadari agar perkembangan pengolahan dan pemurnian mineral juga dilakukan berdasarkan aspek keberlanjutan. Pasokan mineral kritis yang berkelanjutan adalah dasar untuk mencapai tujuan ini. Karena pembatasan pada Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*sustainable development goals* (SDGs)), pemerintah di berbagai negara telah menerapkan kebijakan pertambangan yang protektif terhadap sumber daya mineral kritis untuk mengatur eksplorasi dan produksinya serta membatasi ekspor (Yi et al., 2021). Dampak lingkungan akibat pengolahan dan pemurnian mineral seperti pembuangan *tailing* dan pengolahan limbah tidak dapat dihindari. Dampak lingkungan tersebut tidak hanya memberi dampak secara ekologi, tetapi berpotensi atas kehilangan sumber mineral kritis yang masih terdapat dalam *tailing* atau limbah dari proses hilirisasi mineral utama. Apalagi mineral kritis seringkali terkandung dalam suatu bahan mineral sebagai mineral ikutan dengan kadar yang tidak besar sehingga mineral kritis tersebut selama ini bukan menjadi target produk dan lebih banyak menjadi limbah.

Untuk itu diperlukan paradigma baru dalam pengelolaan sumber daya mineral yang didasarkan atas aspek keberlanjutan, yaitu teknologi pengolahan tuntas. Teknologi pengolahan tuntas berbasis pada pengertian bahwa suatu sumber mineral baik sumber primer maupun sumber sekunder mengandung komoditas mineral yang beragam di mana semua mineral dan logam yang terkandung di dalamnya ditargetkan sebagai produk, sehingga tidak ada mineral atau logam yang dianggap sebagai limbah. Dengan teknologi pengolahan tuntas, kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral dirancang untuk dapat mengekstrak semua logam dan mengolah serta memanfaatkan mineral yang terkandung di dalam suatu bahan mineral menjadi produk yang memiliki nilai jual. Teknologi pengolahan tuntas juga berkaitan erat dengan ekonomi sirkular (*circular economy*) di mana dengan teknologi pengolahan tuntas ini secara simultan juga meminimalisir limbah serta terjadi proses ekonomi sirkular di mana yang dianggap limbah diolah lebih lanjut menghasilkan produk berharga. Teknologi ini juga selaras dengan SDGs karena dengan teknologi pengolahan tuntas ditargetkan tidak ada lagi sisa pengolahan mineral yang mencemari lingkungan atau tidak termanfaatkan (Petrus et al., 2022).

Naskah orasi ini memaparkan perkembangan hilirisasi beberapa mineral kritis di Indonesia serta memaparkan teknologi pengolahan tuntas untuk mendukung hilirisasi mineral kritis yang berkelanjutan sebagai teknologi yang ditawarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan di BRIN, dilanjutkan dengan pemaparan hasil riset aplikasi teknologi pengolahan tuntas untuk hilirisasi beberapa mineral kritis, serta peluang dan tantangan

penerapan teknologi pengolahan tuntas untuk hilirisasi mineral kritis di Indonesia untuk pengelolaan sumber daya mineral yang berkelanjutan dan mendukung program transisi energi nasional. Naskah orasi diakhiri dengan kesimpulan dan penutup.

II. PERKEMBANGAN HILIRISASI MINERAL KRITIS DI INDONESIA UNTUK PROGRAM TRANSISI ENERGI

Pada bab ini akan dibahas tentang mineral kritis yang dimiliki oleh Indonesia untuk mendukung program transisi energi nasional, perkembangan industri pengolahan mineral kritis di Indonesia, serta teknologi pengolahan tuntas untuk hilirisasi mineral kritis yang berkelanjutan yang dirumuskan sebagai hasil integrasi dari kajian komprehensif melalui riset-riset pengolahan mineral yang telah dilakukan di BRIN.

A. Mineral Kritis untuk Mendukung Transisi Energi

Mineral kritis (Tabel 1) sangat dibutuhkan dalam mendukung program transisi energi menuju energi bersih dan implementasi kendaraan listrik untuk mencapai emisi nol bersih Indonesia 2060. Pengembangan teknologi energi bersih dan program transisi energi sangat bergantung pada ketersediaan mineral kritis di dunia.

Mineral kritis yang dibutuhkan untuk mendukung transisi energi dapat dikelompokkan berdasarkan aplikasinya sebagai berikut (Kamran et al., 2023):

1. Elemen-elemen untuk baterai dan penyimpanan energi yang terdiri dari Lithium (Li), Kobalt (Co), Nikel (Ni), Mangan (Mn), Besi (Fe), dan Fosfor (P).
2. Elemen-elemen untuk magnet permanen yang digunakan pada turbin angin dan motor elektrik yang terdiri dari elemen logam tanah jarang (LTJ) yaitu neodymium (Nd), dysprosium (Dy), praseodymium (Pr), dan terbium (Tb).
3. Elemen-elemen untuk aplikasi *photovoltaics* (PV) yang terdiri dari tellurium (Te) dan cadmium (Cd) untuk *cadmium telluride* (CdTe) *solar cells*; and indium (In), gallium (Ga) dan selenium (Se) yang digunakan pada *copper indium gallium diselenide* (CIGS) *solar cells*.
4. Elemen-elemen untuk katalis yang digunakan pada produksi hydrogen bersih ("*green*" *hydrogen production*) untuk kendaraan listrik berbasis fuel cell (*fuel cell electric vehicles* (FCEVs)) dan untuk penyimpanan energi hidrogen, yaitu kelompok logam platina (*Platina Group Metals*/PGMs) yang terdiri platina (Pt), palladium (Pd), rhodium (Rh), dan iridium (Ir).
5. Tembaga (Cu) merupakan mineral kritis yang dibutuhkan untuk banyak sekali aplikasi bidang energi karena tembaga diketahui banyak digunakan pada pembangkit listrik dan elektrifikasi.

Indonesia memiliki sumberdaya dan cadangan atas beberapa mineral kritis dengan jumlah cadangan yang besar di antaranya nikel (50% cadangan nikel dunia), kobalt (5% cadangan kobalt dunia), dan tembaga (3% cadangan tembaga dunia) pada tahun 2023 menurut data USGS (Gambar 1) (Geological Survey, 2024).

Nikel dan kobalt di Indonesia berasal dari bijih nikel laterit, sedangkan tembaga berasal dari bijih chalcopyrite. Akan tetapi, kobalt dalam bijih nikel laterit terkandung dengan kadar yang minor sekitar 0,01-0,2% (Astuti et al., 2016a). Selain nikel, kobalt, dan tembaga, Indonesia juga memiliki potensi PGMs baik sebagai mineral primer maupun mineral ikutan tembaga. Potensi logam tanah jarang (LTJ) yang dibutuhkan pada permanen magnet dan aplikasi lainnya dapat diperoleh sebagai mineral ikutan bijih timah yaitu pasir monasit dan senotim yang selama pemrosesan bijih timah menjadi *tailing* dari benefisiasi timah. Kandungan LTJ dalam pasir monasit sekitar 75%, sedangkan dalam pasir senotim sekitar 50-60%. LTJ juga dapat ditemukan pada beberapa sumber sekunder sebagai mineral ikutan seperti dari abu terbang batubara, bijih nikel laterit, bijih bauksit, dan berpotensi terdapat sebagai mineral *ion adsorption clay*. Sedangkan mineral kritis lainnya seperti Te, Ga, Se dapat ditemukan juga sebagai mineral ikutan tembaga yang akan didapatkan dari lumpur anoda proses pemurnian tembaga di industri smelter tembaga.

Dengan demikian, dapat kita ketahui bahwa potensi-potensi mineral kritis tersebut sebagian besar terdapat sebagai mineral

ikutan yang akan menjadi limbah pada saat pemrosesan mineral utama, kecuali nikel dan tembaga yang diolah sebagai produk utama dari pengolahan bijih nikel laterit dan bijih tembaga.

B. Industri Pengolahan Mineral Kritis di Indonesia

Salah satu upaya pemanfaatan mineral untuk kesejahteraan dan kemakmuran rakyat adalah melalui pengembangan industri dalam negeri berbasis mineral. Berdasarkan RIPIN (Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional) 2015–2035, visi pembangunan industri nasional adalah Indonesia menjadi negara industri tangguh. Strategi pembangunan industri nasional telah dirumuskan dan beberapa sangat terkait dengan industri berbasis mineral, antara lain: pengembangan industri hulu dan industri antara berbasis sumber daya alam, pengendalian ekspor bahan mentah dan sumber energi, peningkatan penguasaan teknologi dan kualitas sumber daya manusia industri, penetapan wilayah pengembangan industri, pembangunan sarana dan prasarana industri, dan peningkatan penggunaan produk dalam negeri.

Di masa lalu, industri pertambangan dan mineral di Indonesia berfokus pada mengeksport bijih mentah secara langsung dibandingkan berpartisipasi dalam rantai nilai produksi lainnya. Namun industri pertambangan telah bertransformasi dan berkembang seiring dengan upaya pemerintah yang aktif dan berkelanjutan untuk mengembangkan industri hilir. Kebijakan tersebut telah mengarah pada fokus baru pada pengolahan komoditas mineral menjadi produk siap pakai, yang telah meningkatkan perekonomian dan memungkinkan negara

untuk menghasilkan produk berkualitas lebih tinggi yang dapat digunakan langsung dalam industri manufaktur. Rencana lebih lanjut juga sedang dilakukan untuk meningkatkan kemampuan pengolahan mineral di Indonesia. Fokus baru pada industri hilir pengolahan mineral mempunyai dampak yang sangat besar terhadap pasar komoditas, mengingat Indonesia adalah produsen nikel terbesar pertama di dunia, produsen timah terbesar kedua, dan produsen bauksit terbesar keempat di dunia, dan salah satu produsen tembaga dan emas terbesar (Ying Wan Loh et al., 2023).

Prioritas baru dalam mengembangkan industri pengolahan dalam negeri telah mendorong perusahaan-perusahaan Indonesia untuk mempertimbangkan kembali strategi rantai pasokan mereka. Industri hilirisasi mineral misalnya, telah menggenjot produksinya berkat beberapa program pengembangan. Sebelum tahun 2014, Indonesia hanya memiliki dua industri pengolahan dan pemurnian nikel. Angka ini melonjak menjadi 13 pada tahun 2020 dan diperkirakan akan meningkat menjadi total 30 pada tahun 2023. Jumlah perusahaan peleburan juga meningkat pesat, dengan 69 perusahaan yang saat ini beroperasi. Dari sisi hilirisasi nikel, 43 smelter RKEF (*rotary kiln electric furnace*) dan 4 industri HPAL (*high pressure acid leaching*) sudah beroperasi, 25 smelter RKEF dan 6 industri HPAL sedang dalam tahap pembangunan, serta 28 RKEF dan 10 HPAL masih dalam proses perencanaan (Ying Wan Loh et al., 2023). Selain itu, langkah strategis yang menandai arah ini adalah pendirian pabrik nikel sulfat dan kobalt sulfat di Pulau Obi, yang keduanya memiliki kapasitas tahunan sebesar 240.000-ton nikel sulfat.

Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP) telah memiliki dua pabrik katoda baterai yang beroperasi dengan kapasitas produksi tahunan sebesar 120.000-ton dan dua fasilitas tambahan yang masih dalam tahap pembangunan dengan produksi tahunan setara nikel-kobalt (Ni-Co) dan nikel sulfida (NiS) sebagai produk mereka (Ying Wan Loh et al., 2023).

Pemain terkemuka dari Cina telah mengumumkan tentang proyek RKEF menghasilkan FeNi dan pelindian asam bertekanan tinggi menghasilkan MHP (*mixed hydroxide precipitate*) dan nikel sulfat untuk mengolah bijih nikel laterit di dalam negeri. Demikian pula, perusahaan kimia dan pertambangan Eropa telah mengumumkan studi untuk mendirikan HPAL dan pabrik pemurnian di Indonesia. Sedangkan untuk tembaga, organisasi pertambangan Amerika dan Indonesia telah memulai pembangunan pabrik peleburan tembaga terbesar di dunia di Gresik (Ying Wan Loh et al., 2023).

Banyak proyek pengolahan baru yang direncanakan untuk beberapa tahun ke depan di Indonesia, terutama berfokus pada industri nikel dan tembaga. Ketika megaprojek ini mulai dilaksanakan, maka akan dapat meningkatkan kapasitas pengolahan turunan logam di Indonesia secara signifikan dan memposisikan negara ini sebagai pemain baru global (*global player*) dan penting dalam industri pengolahan mineral.

Akan tetapi, industri pengolahan mineral yang sudah ada di Indonesia masih menerapkan teknologi pengolahan satu produk atau satu metode pengolahan, sebagai contoh industri *smelter* nikel dengan metode pirometalurgi menggunakan RKEF hanya

memproduksi FeNi dengan masih menghasilkan limbah padat berupa terak. Di sisi lain, industri pengolahan nikel dengan metode hidrometalurgi menggunakan HPAL memproduksi nikel sulfat, kobalt sulfat, atau bahkan baru berupa MHP, dengan masih menghasilkan limbah residu padat sisa hasil pelindian atau hasil pengendapan besi sebelum MHP (Astuti et al., 2015b, 2016b). Limbah residu padat tersebut sejatinya masih mengandung beberapa mineral kritis yang dapat dimanfaatkan atau pengolahan lebih lanjut menghasilkan produk yang bernilai jual.

Selain itu, seperti kita ketahui sebelumnya bahwa sebagian besar mineral kritis yang banyak dibutuhkan dalam program transisi energi justru hanya berupa mineral ikutan yang biasanya akan menjadi limbah dari pemrosesan mineral utama, kecuali nikel dan tembaga yang memang merupakan produk utama dari pengolahan bijih nikel laterit dan bijih tembaga. Mineral kritis yang masuk ke dalam limbah tersebut sangat potensial diekstrak lebih lanjut menghasilkan produk logam dan mineral yang bernilai jual (Islam et al., 2022).

Untuk itu, teknologi hilirisasi mineral yang komprehensif dan terintegrasi dengan memanfaatkan beberapa atau semua metode pengolahan dalam satu jalur produksi menghasilkan beberapa produk mineral kritis yang bernilai jual yang kita sebut sebagai teknologi pengolahan tuntas harus dikaji dan dikembangkan dalam rangka memastikan keberlanjutan rantai pasok mineral kritis untuk mendukung program-program strategis nasional, terutama program transisi energi (Zhao et al., 2023).

C. Teknologi Pengolahan tuntas untuk Pengelolaan Sumber Daya Mineral Kritis yang Berkelanjutan

Teknologi pengolahan tuntas dalam perencanaan industri hilir pengolahan mineral dapat diterapkan untuk memanfaatkan sumberdaya mineral dengan seefisien mungkin dan meningkatkan keuntungan ekonomi, serta memastikan pasokan mineral kritis yang biasanya terdapat dalam sumber daya mineral sebagai mineral ikutan dengan kadar yang tidak dominan. Teknologi pengolahan tuntas berbasis pada suatu pengertian yaitu semua logam dan mineral yang terkandung dalam suatu bahan mineral tambang atau bahan mineral sekunder adalah komoditas yang berharga dan dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Semua logam dan mineral dapat diekstrak dan diolah menghasilkan produk logam dan mineral yang bermanfaat dan bernilai jual. Dengan teknologi pengolahan tuntas, perhitungan keuntungan atau perolehan hasil dari mineral yang kita olah berasal dari semua logam yang terkandung di dalamnya. Sebagai contoh, nilai jual komoditas bijih nikel laterit selama ini hanya diperhitungkan dari persentase kandungan nikel di dalamnya, padahal mineral kritis lainnya yang terdapat dalam bijih nikel laterit juga dapat diekstrak dan menjadi produk logam dan mineral yang berharga. Teknologi pengolahan tuntas memanfaatkan semua metode pengolahan dan pemurnian mineral secara berkesinambungan sesuai dengan target produk logam dan mineral yang akan dihasilkan. Untuk itu, kombinasi metode pengolahan dan pemurnian mineral yang bervariasi untuk mengolah suatu bahan mineral perlu disiapkan dalam rencana pengolahan dan pemurnian mineral supaya target produk logam dan mineral yang ingin diperoleh dapat diproduksi

dengan optimal, serta mineral yang menjadi limbah seminimal mungkin (Heffron, 2020; Srivastava, 2023).

Teknologi pengolahan tuntas ini akan mendukung pengelolaan bahan mineral yang didasarkan atas aspek keberlanjutan yang juga selaras dengan teknologi nir limbah dan ekonomi sirkular. Teknologi pertama, yakni nir limbah adalah proses pengolahan dengan mengambil seluruh unsur berharga yang dapat diperoleh, dengan memanfaatkan sisa hasil pengolahan (SHP) dan sisa hasil pengolahan dan pemurnian (SHPP) untuk berbagai macam aplikasi. Teknologi kedua, yakni ekonomi sirkular yang menitikberatkan pada pembentukan siklus pada suatu proses produksi. Dalam aplikasi teknologi ekonomi sirkular, barang yang mencapai *end of life* atau barang habis pakai digunakan untuk keperluan lain selama dimungkinkan, dilanjutkan dengan proses ekstraktif untuk mengambil kembali unsur berharga apabila tidak terdapat alternatif penggunaan lainnya. Pada teknologi ekonomi sirkular, limbah yang terbentuk diminimasi hingga tujuan akhir yaitu 100% siklus tertutup selama memungkinkan. Kedua teknologi nir limbah dan ekonomi sirkular berkaitan erat dengan teknologi pengolahan tuntas, dengan tujuan akhir pada pengolahan berkelanjutan dengan menggeser sumber produksi primer dari sumber alam ke hasil daur ulang, dan meminimasi limbah yang dihasilkan semaksimal mungkin. Ilustrasi contoh penerapan teknologi pengolahan tuntas pada hilirisasi bijih nikel laterit Indonesia disajikan pada Gambar 2.

III. PEMANFAATAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN TUNTAS PADA HILIRISASI MINERAL KRITIS INDONESIA

Riset tentang pemanfaatan teknologi pengolahan tuntas untuk mengekstrak mineral kritis terutama untuk mendukung program transisi energi telah dilakukan dari sumber daya primer dan sumber daya sekunder yaitu bijih nikel laterit, sisa hasil pengolahan (SHP) yaitu abu terbang batubara (*coal fly ash/* CFA), dan limbah industri berupa katalis bekas.

A. Pengolahan tuntas dari Sumber Daya Mineral Primer: Bijih Nikel Laterit

Bijih nikel laterit mengandung Ni antara 0,6 – 3% dan Fe antara 25–60% tergantung pada jenis mineral pembawanya yaitu limonit atau saprolit. Bijih nikel laterit terutama jenis limonit juga mengandung kobalt walaupun dengan kadar yang rendah yaitu sekitar 0,01 – 0,2% (Astuti et al., 2016b).

Sebelum berkembangnya era kendaraan listrik dan transisi energi, hanya bijih jenis saprolit (kadar Ni 1,7-3%) yang diolah menggunakan metode pirometalurgi menghasilkan feronikel (FeNi) dan *nickel matte* sebagai bahan pemadu pada industri baja tahan karat (*stainless steel*) dan *superalloy* di PT. Antam dan PT. INCO (Astuti et al., 2016b). Tetapi dengan meningkatnya kebutuhan nikel untuk bahan prekursor katoda baterai Li-NMC (*nickel-manganese-cobalt*), bijih jenis limonit (kadar Ni 0,8-1,7%) juga diolah menggunakan metode hidrometalurgi menghasilkan produk MHP (*mixed hydroxide precipitate*) yang kemudian dilanjutkan proses pengolahan lebih lanjut menghasilkan nikel sulfat dan juga kobalt sulfat (jika dalam bijih terkandung kobalt) sebagai prekursor katoda baterai Li-ion. Proses hidrometalurgi menghasilkan limbah padat berupa residu hasil pelindian dalam jumlah yang sangat besar karena proses hidrometalurgi hanya mengambil Ni yang kadar di dalam bijih hanya maksimal 3% berat sehingga masih tersisa sekitar minimal 97% berat limbah padat residu pelindian. Residu pelindian mengandung Fe dengan kadar >60% yang seharusnya dapat diolah lebih lanjut menghasilkan produk logam besi atau senyawa besi (Fan & Gerson, 2013; Oxley & Barcza, 2023).

Teknologi pengolahan tuntas untuk mengekstrak Ni, Co, Mn, Fe, dan logam-logam berharga lain yang ada di dalam bijih nikel laterit Indonesia telah dikembangkan dan telah menghasilkan beberapa produk yaitu sebagai bahan baku prekursor katoda baterai Li-NMC dan produk konsentrat FeNi yang dapat menjadi bahan baku industri baja tahan karat (Astuti et al., 2023).

Pada penelitian yang telah dilakukan digunakan dua metode proses pengolahan secara bertahap yaitu Proses Hidrometalurgi dan Proses Pirometalurgi.

Proses hidrometalurgi digunakan sebagai proses pertama untuk mengekstrak nikel, kobalt, dan mangan yang akan menjadi prekursor katoda baterai. Bijih nikel laterit dari Halmahera (Ni: 1,72%; Fe: 34,12%; Co: 0,12%; Mn: 0,99%; MgO: 10,80%; SiO₂: 9,86%) dilindi pada kondisi atmosferik (tanpa tekanan tinggi) (Astuti et al., 2015, 2021; Wanta et al., 2018, 2020, 2022). Pada penelitian dilakukan studi mengenai efektifitas beberapa reagen pelindian yang terdiri dari asam sulfat, asam nitrat, asam klorida, asam sitrat, asam laktat, dan asam oksalat (Astuti et al., 2015, 2021; Wanta et al., 2018, 2020, 2022). Pada penelitian dilakukan studi mengenai efektifitas beberapa reagen pelindian yang terdiri dari asam sulfat, asam nitrat, asam klorida, asam sitrat, asam laktat, dan asam oksalat (Astuti et al., 2016a, 2016b). Hasil pelindian menunjukkan bahwa asam sulfat dan asam sitrat memberikan efektifitas pelindian yang sama dengan persen rekovery nikel sekitar >90%. Tetapi asam sitrat lebih selektif melindi nikel dibandingkan asam sulfat. Pelindian dilakukan pada tekanan atmosfer dan suhu sekitar 60 oC dengan waktu pelindian sekitar 5 jam. Proses pelindian menghasilkan filtrat yang mengandung Ni, Co, dan Mn, serta menyisakan unsur besi dalam residu padat (Astuti et al., 2023).

Asam sitrat digunakan sebagai alternatif reagen pelindian selain asam sulfat. Selain teknologi pengolahan tuntas, riset berbasis teknologi ramah lingkungan juga dilakukan untuk mendukung pemanfaatan sumber daya mineral yang berkelanjutan. Asam sitrat merupakan asam organik yang mudah terdegradasi di alam, dapat diproduksi sendiri melalui metabolisme mikroba jamur *Aspergillus Niger sp.* dan selektif dalam melarutkan logam (Astuti et al., 2015; Mubarak et al., 2013).

Proses selanjutnya adalah merecoveri nikel, kobalt dan mangan yang terlarut dalam filtrat hasil pelindian. Pada filtrat hasil pelindian asam sulfat, perolehan kembali nikel, kobalt, dan mangan dilakukan menggunakan pengendapan bertingkat yaitu pertama mengendapkan besi terlarut melalui pengaturan pH menggunakan natrium karbonat sehingga tercapai pH sekitar 2-5. Pengendapan kedua dilakukan untuk mendapatkan produk endapan campuran nikel, kobalt, dan mangan menggunakan asam oksalat produk senyawa oksalat yang diberi nama *Mixed Oxalate Precipitate* (MOP) dengan kandungan Ni (74-87%), Co (2-6%), dan Mn (4-10%), sebagaimana telah didaftarkan Paten No. P00202006898 (Suriанти et al., 2022; Astuti et al, 2020).

Pada penelitian yang telah dilakukan juga diuji coba pengendapan nikel, kobalt, dan mangan dari filtrat hasil pelindian dengan asam sitrat, di mana dari proses ini filtrat hasil pelindian langsung dicampur dengan asam oksalat, tanpa pengendapan besi dengan alkali terlebih dahulu, menghasilkan produk senyawa oksalat yaitu MOP yang mengandung Ni (70-80%), Co (2-3%), dan Mn (4-6%), sebagaimana telah didaftarkan Paten No. P00202204237 (Astuti et al., 2023a).

MOP merupakan jenis senyawa campuran Ni-Co-Mn dalam bentuk oksalat yang baru diperkenalkan dari riset ini, karena pada riset-riset sebelumnya, campuran Ni dan Co dari hasil pelindian bijih nikel laterit diproduksi dalam bentuk MHP (*mixed hydroxide precipitate*) atau MSP (*mixed sulfide precipitate*) (Astuti, Nurjaman, et al., 2023). MOP dapat menjadi prekursor Ni, Co, dan Mn untuk diekstrak lebih lanjut menjadi nikel sulfat, kobalt sulfat, dan mangan sulfat yang dapat digunakan sebagai katoda baterai Li-NMC. Proses pembentukan MOP tidak hanya mengendapkan Ni dan Co dari bijih nikel laterit, tetapi juga mengendapkan Mn yang ikut terkandung dalam bijih nikel laterit di mana Mn juga diperlukan sebagai prekursor katoda baterai Li-NMC (Astuti et al., 2023).

Proses selanjutnya adalah Proses Pirometalurgi terhadap residu sisa hasil pelindian. Residu padat sisa hasil pelindian mengandung Fe (30-40%) dan Ni (0,5-0,9%). Mengadopsi beberapa riset sebelumnya tentang produksi FeNi dan NPI dari bijih nikel laterit menggunakan metode pirometalurgi sebagaimana sudah didaftarkan Paten No. P00202106557 (Bahfie et al., 2021) dan P00202215639 (Nurjaman et al., 2022), residu padat hasil pelindian juga berpotensi diolah lebih lanjut menggunakan metode pirometalurgi (Andika et al., 2019a, 2019b; Astuti et al., 2018; Bahfie, Manaf, Astuti, & Nurjaman, 2021a, 2021b; Bahfie et al., 2021; Bahfie et al., 2023; Nurjaman et al., 2021a; Nurjaman et al., 2021b; Nurjaman et al., 2021c; Petrus et al., 2019a; Putera et al., 2023). Pada penelitian digunakan metode kombinasi reduksi selektif dan pemisahan magnetik menghasilkan konsentrat FeNi ataupun peleburan langsung dalam tungku busur listrik (*electric arc furnace*)

menghasilkan produk logam NPI atau FeNi. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, proses pengolahan residu pelindian bijih laterit dilakukan menggunakan metode reduksi selektif yang dimulai dengan pembuatan pellet campuran residu padat dengan reduktor berupa batubara antrasit dan aditif berupa sodium sulfat. Reduksi dilakukan dengan variasi parameter reduksi suhu (950, 1050, 1150, dan 1250°C), persen aditif sodium sulfat (5, 10, 15 dan 20%), persen reduktor antrasit (1, 3, dan 5%), dan waktu penahanan reduksi (15, 30, 45, 60, dan 75 menit). Setelah proses reduksi, dilakukan pemisahan magnetik menggunakan *magnetic separator* dengan kekuatan magnet 500 Gauss menghasilkan konsentrat FeNi dan tailing non-magnetik. Dari hasil penelitian diketahui bahwa kondisi reduksi yang menghasilkan onsentrat FeNi dengan kandungan Ni terbesar (5,74%) dan Fe (73,18%) adalah 10% aditif sodium sulfat, 1% reduktor antrasit, pada suhu 1150oC dengan waktu penahanan reduksi 60 menit. Produk konsentrat FeNi dan hasil karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscope*) disajikan pada Gambar 3. Produk konsentrat FeNi ini berpotensi digunakan pada industri baja tahan karat atau bahkan dapat diekstrak kembali Ni nya menggunakan metode hidrometalurgi menghasilkan bahan prekursor baterai (Nurjaman et al., 2021a).

Skandium (Sc) juga terkandung di dalam bijih nikel laterit dengan kadar sekitar 50-100 ppm dan dapat diekstrak bersama dengan logam utama. Riset reduksi selektif dan pemisahan magnetik menunjukkan bahwa Sc terkonsentrasi pada *tailing* dari proses pemisahan magnetik. Hal ini menjadi ide yang menarik untuk selanjutnya mengolah *tailing* pemisahan magnetik untuk mengekstrak Sc (Chassé et al., 2017).

Rangkaian proses pengolahan tuntas bijih nikel laterit yang telah dilakukan diilustrasikan pada Gambar 4. Pengolahan logam-logam kritis dari bijih nikel laterit menggunakan metode hidrometalurgi dan pirometalurgi secara berkesinambungan ini dapat dilakukan pada skala yang lebih besar sehingga sangat potensial untuk diterapkan pada industri secara terintegrasi menghasilkan beberapa produk sekaligus dengan jumlah limbah yang semakin sedikit.

Teknologi ini tentunya memberikan keuntungan ekonomi karena menghasilkan produk-produk bernilai jual yang beragam dengan penggunaan energi, utilitas, dan sumber daya serta modal yang sama atau bahkan lebih kecil karena tidak perlu mempersiapkan unit/area penyimpanan atau pengolahan limbah yang besar dan tidak membutuhkan biaya transportasi pemindahan bahan/limbah keluar area industri. Sehingga dapat dikatakan bahwa capital expenditures (CapEx) dan operating expenses (OpEx) yang dibutuhkan lebih kecil jika menerapkan teknologi pengolahan tuntas pada pengolahan bijih laterit ini (Nurjaman et al., 2021b).

B. Pengolahan tuntas dari Sisa Hasil Pengolahan (SHP): Abu Terbang Batubara (*coal fly ash*)

Potensi mineral kritis dalam sumber ini menarik dikembangkan secara komprehensif dengan mengimplementasikan pendekatan pengolahan tuntas berbasis pada potensi lokal yang dimiliki karena keberadaan mineral kritis pada SHP ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik geologi suatu daerah yang sangat *site specific*.

Dengan urutan proses yang didasarkan atas pertimbangan aspek peningkatan nilai tambah, teknis, lingkungan, dan kebutuhan energi, maka tahapan awal pemanfaatan CFA adalah pemungutan material *cenospheres*, sebagaimana sudah didaftarkan Paten No. P00202004175 (Sutijan et al., 2020). *Cenospheres* adalah material aluminosilikat dengan bentuk bola yang memiliki densitas lebih kecil dari air, dengan fraksi massa umumnya sebanyak 0,3-1,5% dari total CFA. Pemisahan *cenospheres* relatif mudah dilakukan, dengan prinsip pemisahan fisis dan nilai produk yang cukup tinggi. Pada penelitian yang telah dilakukan dihasilkan suatu invensi pembuatan Modified Gravity Separator (MGS) yang merupakan alat pemisah partikel padat dari aliran gas ataupun pemisahan dua jenis partikel padat atau lebih dari aliran gas berdasarkan densitas dan ukuran partikelnya. Alat ini terdiri dari empat bagian ruang yaitu kolom umpan (1), ruang utama (2), kolom pengumpul (3), dan kolom akhir (4). Setiap partikel yang mengalir dan memasuki ruang utama alat ini akan memiliki reologi aliran dan lintasan yang berbeda-beda. Alat ini memanfaatkan fenomena tersebut. MGS pada invensi ini dilengkapi dengan blower dan pengumpan padatan yang masing-masing dapat diatur kecepatannya. Kolom pengumpul (3) berjumlah 10 unit yang dapat dievaluasi dan produk dari pemisahan dapat diakumulasikan menjadi satu sebagai hasil dari evaluasi pemisahan. *Recovery cenospheres* dapat diperoleh dengan kisaran 76% - 81% di mana reduksi kebutuhan air untuk mendapatkan *cenospheres* sebagai produk akhir dapat berkurang sebanyak 53% apabila dibandingkan dengan proses basah tanpa menggunakan MGS.

Tahap selanjutnya yaitu pengolahan LTJ yang terkonsentrasi di dalam CFA dengan proses hidrometalurgi dan pemisahan selektif sebagaimana sudah didaftarkan Paten No. P00202006702 (Petrus et al., 2020) dan P00202311503 (Mufakhir et al., 2023). Abu terbang Batubara (CFA) memiliki kandungan LTJ dalam kisaran 300-1000 ppm (Tajayani et al., 2023). Metode pengolahan logam tanah jarang (LTJ) dari limbah padat abu terbang batubara melalui proses pelindian. Produk yang dihasilkan dari invensi ini ialah berupa filtrat yang mengandung unsur LTJ dengan rekovery 32,8 % hingga 64,1 %. Invensi ini merupakan bagian dari upaya pemanfaatan limbah abu terbang batubara sebagai sumber alternatif LTJ. Metode pengolahan LTJ dari limbah padat abu terbang batubara meliputi proses pemisahan fisik dengan magnetik separator untuk memisahkan komponen magnetik dengan non-magnetik, proses pendahuluan dengan NaOH dan proses pelindian dengan asam asetat. Proses pemisahan fisik dan proses pendahuluan dengan NaOH memegang peran penting dalam menunjang keberhasilan pelindian dengan asam. Selain meningkatkan selektivitas asam terhadap LTJ, proses pendahuluan juga bertujuan untuk mengubah ikatan LTJ hingga pada akhirnya diperoleh filtrat yang mengandung LTJ. Metode pengolahan LTJ dari abu terbang batubara diharapkan mampu menjadi salah satu sumber alternatif penghasil LTJ agar dapat mengimbangi permintaan LTJ (Nugroho et al., 2019; Tajayani et al., 2023).

Sebagai residu akhir adalah senyawa aluminosilikat yang dapat dimanfaatkan untuk pembuatan material konstruksi berbasis *high volume fly ash* (HVFA) atau geopolimer,

sebagaimana sudah diberi Paten No. IDP000090836 (Petrus et al., 2023) di mana CFA juga dikombinasikan dengan silika dari kerak pipa geothermal untuk pembuatan geopolimer dengan karakteristik yang baik. Pembuatan geopolimer dari campuran CFA, silika geothermal dan NaOH dengan metode kering yang meliputi pembuatan aktivator padat dari silika geothermal dan alkali dilanjutkan dengan pembuatan geopolimer dari abu terbang batubara. Produk geopolimer yang dihasilkan memiliki karakteristik kuat tekan antara 25 – 40 Mpa (Petrus et al., 2019b; Petrus et al., 2021a; Petrus et al., 2021b; Petrus et al., 2022; Septriana et al., 2017). Penerapan teknologi pengolahan tuntas pada kasus CFA tersebut dapat mengeliminasi kuantitas abu pembakaran batubara dan berpotensi memberikan nilai tambah bagi perusahaan, masyarakat dan keberlangsungan hidup alam yang lestari.

CFA juga telah dimanfaatkan untuk pembuatan zeolit (Na-A Zeolite) yang dapat digunakan sebagai adsorben Ce, sebagaimana telah didaftarkan Paten No. P00202311532 (Daulay et al., 2023). Pada penelitian ini sintesis zeolit dari CFA dilakukan dengan teknik pelindian H_2SO_4 dan inkubasi NaOH. Selanjutnya, campuran tersebut disaring lalu mengambil padatnya lalu dicuci dengan aquades. Langkah terakhir adalah memanaskan kembali sehingga mendapatkan zeolit. Produk zeolit yang dihasilkan dari invensi ini memiliki karakter kristalinitas tinggi yakni mencapai 92,13% dan perbandingan mol $SiO_2:Al_2O_3$ yakni 6:1. Uji adsorpsi logam cerium atas zeolit ini memiliki efisiensi adsorpsi yakni 97% (Daulay et al., 2024a).

Sintesis silikon nanopartikel dari CFA juga telah dilakukan. Sintesis SiO_2 dari CFA dilakukan dengan metode sol gel menggunakan NaOH dan HCl. Sebanyak 2 g CFA ditambahkan ke dalam 100 mL NaOH 2 M lalu diaduk dengan kecepatan 200 rpm pada suhu $90\text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Dilakukan penyaringan, fraksi cair ditambahkan HCl 1 M setetes demi setetes hingga pH 9. Polietilen glikol ditambahkan bersama HCl 1 M setetes demi setetes hingga pH 3. Dilakukan penyaringan, dan fraksi padat dicuci berulang kali menggunakan aquades. Fraksi padat kemudian dipanaskan pada suhu $90\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam. Setelah pemanasan, dilakukan kalsinasi pada suhu $550\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam untuk memperoleh SiO_2 . Kemudian sintesis Si dari SiO_2 menggunakan metalotermik menggunakan Mg dengan perbandingan mol 1:2 kemudian direduksi pada suhu $800\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam dalam atmosfer argon. Tahap pemurnian pertama dilakukan dengan hasil kalsinasi ditambahkan ke dalam campuran 100 mL akuades dan etanol lalu diaduk dengan kecepatan 200 rpm pada suhu $90\text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Tahap pemurnian kedua adalah menambahkan 100 mL HCl 10% dan didiamkan selama 12 jam. Tahap pemurnian ketiga dilakukan dengan menambahkan 100 mL HF 4% dan didiamkan selama 15 menit. Yang terakhir dicuci dengan air suling beberapa kali dan dipanaskan pada suhu $90\text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam untuk mendapatkan nanopartikel silikon berpori. Produk Silikon diaplikasikan sebagai anoda baterai (Daulay et al., 2024b).

Riset pengembangan teknologi pengolahan tuntas telah dilakukan di BRIN bekerjasama dengan UGM dengan menghasilkan produk *cenosphere*, LTJ, zeolite, geopolimer,

dan silikon (Gambar 5). Hasil-hasil riset ini dapat berpotensi menjadi solusi bagi penanganan limbah CFA yang masih menumpuk. Dengan teknologi ini, selain menguntungkan secara ekologi, keuntungan ekonomi juga dapat diperoleh karena produknya lebih beragam mulai dari produk bernilai jual tinggi untuk aplikasi transisi energi seperti LTJ, silika, dan silikon, hingga produk dengan kebutuhan dalam jumlah besar seperti geopolimer terutama untuk kebutuhan khusus dan zeolit (Petrus, Olvianas, et al., 2021; Tajayani et al., 2023a).

Secara ekonomi diperhitungkan bahwa potensi ekonomi jika CFA dimanfaatkan untuk setiap 1 MW listrik yang dihasilkan dari PLTU adalah untuk pengolahan LTJ sekitar USD 12.853 (+/- 5.771), produksi cenosphere sekitar USD 153, produksi HFVA/ semen beton sekitar USD 37.407 (+/- 15.576), dan produksi geopolimer sekitar USD 35.069 (+/- 14.602). Perhitungan dilakukan dengan mengestimasi dari rata-rata 12 PLTU yang dikaji oleh BRIN bersama kolega dari UGM untuk kondisi saat ini. Perhitungan ini akan layak jika proses produksi dilakukan pada skala industri (Sutijan et al., 2020; Tajayani et al., 2023a).

C. Pengolahan tuntas dari Limbah Industri: Katalis Bekas

Logam-logam yang termasuk dalam klasifikasi mineral kritis juga dapat diekstrak dari sumber sekunder dari limbah industri yang dapat disebut sebagai *urban mining* yang salah satunya adalah limbah katalis bekas dari industri petrokimia maupun industri petroleum. Katalis bekas mengandung berbagai mineral kritis seperti Ni, Co, La, Mo, Pt, dan Pd. Kadar logam dalam katalis

bekas biasanya lebih tinggi dari kandungan logam yang sama pada suatu bahan mineral dari tambang, sehingga pengolahan logam dari katalis bekas menguntungkan secara teknis dan ekonomis. Struktur mineral yang lebih sederhana dibandingkan sumber daya mineral dari alam juga lebih memudahkan proses pengolahan logam kritis dari limbah industri (Astuti et al., 2018; Petrus et al., 2019).

Pada penelitian yang telah dilakukan, katalis bekas dari industri petroleum mengandung Lantanum (La) diolah menggunakan teknologi pengolahan tuntas. Katalis bekas yang digunakan mengandung La sebesar 1,9% yang diekstrak kembali menggunakan metode hidrometalurgi melalui pelindian pada kondisi atmosferik dengan asam sitrat sebagai reagen pelindian menghasilkan filtrat pelindian mengandung La dengan rekoveri pelindian >95% dan dilanjutkan dengan pengendapan oksalat menghasilkan lantanum oksalat dengan kemurnian >98%, sebagaimana sudah diberi Paten No. IDS000003319 (Astuti et al., 2020; Astuti, Mufakhir, et al., 2023; Astuti, Prilitasari, et al., 2018; Petrus, Wijaya, et al., 2019). Lantanum oksalat dikalsinasi untuk menghasilkan produk lantanum oksida (La_2O_3).

Proses pelindian menghasilkan residu padat yang mengandung mineral aluminosilikat. Mineral aluminosilikat dapat diolah lebih lanjut menjadi zeolit atau diolah menjadi material geopolimer mengadopsi hasil invensi dari pengolahan CFA menjadi zeolite dan material geopolimer yang dijelaskan sebelumnya (Petrus et al., 2019b; Petrus et al., 2022; Petrus, et al., 2021c). Rangkaian pengolahan tuntas dari limbah katalis disajikan pada Gambar 6.

Proses yang sama juga dapat dilakukan untuk katalis bekas Ni, Co, dan Mo karena memiliki karakteristik yang sama yaitu dengan mineral penyangga aluminosilikat. Katalis bekas mengandung Ni sebesar 37%, Mo sebesar 67%, Co sebesar 11%. Ni, Co, dan Mo dapat dilindi menggunakan asam sulfat maupun asam sitrat, dilanjutkan dengan pengendapan oksalat menghasilkan produk nikel oksalat dan kobalt oksalat yang dapat digunakan sebagai prekursor Ni dan Co pada katoda Li-NMC. Filtrat hasil pelindian Ni maupun Co juga dapat dilanjutkan untuk sintesis NMC (*Nickel-Manganese-Cobalt*) secara langsung untuk aplikasi katoda Li-ion menggunakan berbagai metode sintesis yaitu kopresipitasi, hidrotermal, sol-gel, maupun *solid-state*, sebagaimana telah didaftarkan Paten No. P00202311461 (Astuti, Haryono, et al., 2023; Astuti, Sumardi, et al., 2023; Ayu Panggabean et al., 2023; Kartini et al., 2022; Rezki et al., 2021; Utama et al., 2021; Wanta et al., 2019, 2021).

Teknologi pengolahan tuntas dapat memberikan solusi bagi penyelesaian masalah limbah padat mengandung logam berat yang sejatinya adalah logam-logam kritis yang sangat dibutuhkan untuk perekonomian negara, sehingga dengan teknologi ini, secara simultan dapat mengatasi masalah lingkungan sekaligus menyediakan material logam-logam kritis yang bernilai tinggi. Selain itu tentunya memberikan keuntungan ekonomi karena selama ini limbah katalis belum dimanfaatkan di Indonesia dan masih dijual langsung ke luar negeri karena industri pengolahan katalis bekas di Indonesia belum ada. Dengan proses yang sederhana dan ramah lingkungan, kita dapat memproduksi beberapa jenis mineral kritis terutama untuk aplikasi baterai

seperti Ni, Co serta La yang dapat menjadi doping baterai dari limbah industri di dalam negeri. Industri pengguna katalis seperti industri petrokimia dan petroleum juga dapat menghemat unit penyimpanan limbah katalis yang selama ini menjadi beban bagi operasionalnya (Astuti et al., 2018; Cleary Wanta et al., n.d., 2020; Rezki et al., 2021).

IV. PELUANG DAN TANTANGAN IMPLEMENTASI TEKNOLOGI PENGOLAHAN TUNTAS PADA HILIRISASI MINERAL KRITIS DI INDONESIA

Teknologi pengolahan tuntas berpeluang diimplementasikan pada skala industri dan komersial untuk mengolah sumber daya mineral yang ada di Indonesia karena saat ini industri pengolahan mineral di Indonesia dengan berbagai metode proses sedang sangat berkembang sehingga kombinasi antara metode proses tersebut dapat didesain kembali untuk penerapan teknologi pengolahan tuntas. Sebagai contoh bahwa industri pengolahan bijih nikel laterit yang telah ada di Indonesia yang saat ini sudah mengolah dengan metode hidrometalurgi menggunakan HPAL menghasilkan produk MHP dan residu padat HPAL, dapat melanjutkan proses pengolahan residu padat HPAL menggunakan metode pirometalurgi menghasilkan feronikel maupun *nickel matte* dan pada akhirnya dapat memanfaatkan terak peleburan feronikel menjadi bahan konstruksi. Begitu juga dengan industri pengolahan bauksit menghasilkan produk alumina dan residu

padat berupa lumpur merah (*red mud*), dapat melanjutkan proses pengolahan residu padat dengan mengekstrak logam berharga dari lumpur merah tersebut menghasilkan beberapa produk seperti besi, galium, skandium, dan terakhir dapat memanfaatkan sisa residu terakhirnya menjadi material konstruksi. Implementasi teknologi pengolahan tuntas juga berpeluang besar untuk mengolah limbah katalis bekas dari berbagai industri kimia dan petroleum di Indonesia karena selama ini katalis bekas tidak diolah di dalam negeri tetapi dijual sebagai limbah padat ke luar negeri atau hanya sebagai campuran pada industri semen, padahal katalis bekas mengandung logam-logam bernilai tinggi seperti LTJ, PGM, nikel, kobalt, molybdenum dll. Teknologi ini berpotensi untuk diterapkan pada semua sumber daya mineral yang ada, sehingga teknologi pengolahan tuntas harus menjadi target dalam setiap mendesain industri pengolahan mineral (Srivastava, 2023).

Selain itu, teknologi pengolahan tuntas juga sangat berpeluang untuk diimplementasikan karena Pemerintah Indonesia telah berkomitmen untuk ikut serta dalam target emisi nol bersih 2060 dengan Program Transisi Energi Nasional diantaranya Program Percepatan Kendaraan Listrik (EV), program-program CCUS (*carbon capture utilization and storage*), program energi baru terbarukan (hidrogen, sel surya, baterai, turbin angin), dan elektrifikasi yang lebih luas dan masif. Semua program-program tersebut membutuhkan mineral-mineral kritis dalam jumlah yang besar sehingga kebutuhan mineral kritis akan terus meningkat. Sedangkan mineral-mineral kritis banyak terkandung dalam sumber mineral sebagai mineral ikutan sehingga memberi

peluang bagi implementasi teknologi pengolahan tuntas untuk memastikan semua komoditas mineral kritis baik sebagai mineral utama maupun mineral ikutan dapat diekstrak dan diolah menjadi produk logam dan mineral.

Peluang lain yang penting adalah Indonesia dengan potensi sumber daya mineral yang melimpah memiliki peluang yang besar menjadi pemain utama yang strategis dalam rantai pasok mineral kritis global jika sumber daya tersebut dikelola dengan baik untuk memberikan manfaat sebesar-besarnya bagi bangsa Indonesia. Semua titik produksi dari tahap penambangan, pengolahan, dan pemulihan bahan mineral apabila dilakukan berlandaskan prinsip berkelanjutan maka dapat menjaga manfaat dan meminimalisir potensi dampak pencemaran yang dapat ditimbulkan.

Peluang implementasi teknologi pengolahan tuntas juga sangat berkaitan erat dengan teknologi nir limbah dan ekonomi sirkular. Kesadaran sebagian besar penduduk dunia akan teknologi ekonomi sirkular dan nir limbah memberi peluang teknologi pengolahan tuntas dapat diimplementasikan pada industri hilirisasi mineral di tanah air.

Tetapi peluang-peluang tersebut tidak begitu saja dapat dicapai karena adanya tantangan-tantangan yang menjadi faktor penghambat implementasi teknologi pengolahan tuntas tersebut. Kebijakan dan peraturan Pemerintah terkait pengelolaan sumber daya mineral yang belum sepenuhnya mendukung penerapan hasil riset dan inovasi pengolahan mineral dalam negeri pada industri menjadi tantangan utama upaya implementasi teknologi

ini. Kurangnya peluang kolaborasi antara lembaga riset dengan industri juga menutup peluang penerapan teknologi pengolahan tuntas pada skala yang besar, karena lembaga penelitian tidak dapat mengimplementasikan hasil risetnya pada skala besar tanpa dukungan dari industri sebagai calon pengguna. Tantangan lain dari penerapan teknologi pengolahan tuntas adalah karena belum adanya dukungan regulasi dan kebijakan dari Pemerintah di mana sebagian sisa hasil pengolahan mineral masih digolongkan sebagai limbah B3 sehingga pemanfaatan residu hasil pengolahan mineral masih belum dapat dilakukan serta belum adanya standar nasional yang dibuat oleh Pemerintah atas produk-produk yang dihasilkan dari pengolahan residu mineral. Untuk itu diperlukan suatu kebijakan dan regulasi yang berbasis hasil riset dalam negeri untuk mewujudkan hilirisasi mineral yang berkelanjutan.

Dalam menghadapi masa depan yang penuh tantangan dan ketidakpastian, penting bagi kita untuk tetap berpegang pada komitmen untuk mengelola sumber daya bumi dengan bijaksana dan berkelanjutan. Dengan memanfaatkan teknologi pengolahan tuntas yang berpegang pada potensi nir limbah yang tepat dan menerapkan prinsip-prinsip ekonomi sirkular, diharapkan dapat mengatasi tantangan dan menciptakan lingkungan yang seimbang, ekonomi yang berkelanjutan, serta masa depan yang lebih baik bagi generasi mendatang.

V. KESIMPULAN

Potensi sumber mineral kritis untuk mendukung program transisi energi nasional tersedia di Indonesia baik dalam bentuk sumber primer, sumber sekunder, dan sumber non-konvensional. Hilirisasi mineral kritis Indonesia yang berkelanjutan sangat mendukung kelestarian lingkungan dan sumber daya mineral itu sendiri. Untuk mendukung hal tersebut, teknologi pengolahan tuntas pada hilirisasi mineral kritis Indonesia telah dikembangkan pada berbagai sumber daya mineral di Indonesia baik dari bahan tambang, sisa hasil pengolahan mineral, dan limbah industri. Hasil penelitian yang dilakukan telah menunjukkan bahwa kombinasi rangkaian proses benefisiasi, proses ekstraksi metalurgi, dan pemanfaatan mineral secara simultan dapat diterapkan untuk mengolah suatu sumber mineral yang mengandung beberapa jenis logam dan mineral. Teknologi pengolahan tuntas telah menghasilkan berbagai jenis produk berharga dan bernilai jual, sehingga seminimal mungkin logam dan mineral yang terkandung dalam suatu bahan mineral terbuang menjadi residu atau terak. Teknologi yang telah dikembangkan ini berpotensi dapat diterapkan pada semua sumber daya mineral

yang ada di Indonesia. Teknologi pengolahan tuntas diharapkan dapat mendukung hilirisasi mineral kritis yang berkelanjutan di Indonesia dalam rangka menyediakan bahan baku material untuk program transisi energi dan program strategis lainnya.

VI. PENUTUP

Teknologi pengolahan tuntas telah berhasil dikembangkan dan memberikan potensi peluang pemanfaatan dan implementasinya pada skala komersial dan industri. Namun demikian, masih terdapat beberapa tantangan dalam mewujudkannya, untuk itu diperlukan beberapa program dan kebijakan sehingga teknologi ini dapat diterapkan pada industri mineral di Indonesia dalam rangka mewujudkan hilirisasi mineral kritis yang berkelanjutan yaitu penguatan dukungan kebijakan dan peraturan dari Pemerintah dalam pengelolaan sumber daya mineral di Indonesia yang berbasis pada hasil riset dan inovasi dalam negeri, penguatan kolaborasi lembaga penelitian dengan industri untuk implementasi teknologi pengolahan tuntas pada industri, dan penguatan dukungan pendanaan dan infrastruktur untuk proses transfer teknologi dari peneliti kepada industri. Diharapkan bahwa teknologi ini dapat terus dikembangkan dan diimplementasikan di Indonesia untuk mengolah semua potensi sumber daya mineral Indonesia.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Mengakhiri Orasi Pengukuhan Profesor Riset ini, izinkan saya menyampaikan rasa syukur ke hadirat Allah SWT atas segala berkah dan karunia-Nya sehingga acara ini berjalan lancar sesuai dengan harapan. Terimakasih saya sampaikan kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. Joko Widodo; Kepala dan Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc. dan Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, ST., M.Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng.; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D.; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah yang terdiri dari Prof. Dr.rer. nat. Evvy Kartini, Prof. Dr. Nurul Taufiqu Rohman, dan Prof. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, D.Eng. Ucapan terimakasih juga saya sampaikan kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A.; Kepala ORNM, Prof. Dr. Ratno Nuryadi; Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Dr. Anggoro Tri Mursito; Kepala BOSDM BRIN, Ratih Retno Wulandari, M.Si.; dan Deputy SDMI BRIN, Prof. Dr. Giri Rahman Putra atas kesempatan dan perhatian yang diberikan

kepada saya. Apresiasi juga kami sampaikan kepada seluruh panitia penyelenggara acara pengukuhan profesor riset hari ini.

Saya juga ingin menyampaikan penghargaan kepada seluruh sivitas BRIN di KS Iskandar Zulkarnain, Tanjung Bintang, atas kerjasama dan kebersamaan, selama kurang lebih 20 tahun bekerja dan bertumbuh bersama mengembangkan penelitian mineral Indonesia sejak UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung LIPI (UPT BPML LIPI) (2003-2016), Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI (2016-2021) hingga bergabung dengan BRIN menjadi Pusat Riset Teknologi Pertambangan (2021-sekarang). Terimakasih juga saya sampaikan kepada semua sivitas Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN di semua lokasi *Co-Working Space* di Serpong, Bandung, Yogyakarta, dan Lampung atas kerjasama dan perhatiannya selama ini.

Terimakasih kepada semua guru dan mentor yang telah mendidik saya dari pendidikan dasar, menengah, tinggi, hingga menjadi peneliti: Ir. Adil Jamali, M.Sc., Kepala UPT BPML LIPI (2005-2010) yang memberikan arahan saat menentukan bidang kepakaran peneliti saya; Prof. Dr. M. Zaki Mubarak dan Prof. Ir. Siti Khodijah Chaerun, Ph.D., Prodi Teknik Metalurgi ITB atas bimbingannya memulai riset tentang metalurgi pengolahan pada jenjang S2 dan Prof. Tsuyoshi Hirajima, Kyushu University atas bimbingannya saat penulis menempuh jenjang S3. Terimakasih

untuk semua kolega dari UGM, ITERA, UI, ITK, dan UNILA atas kolaborasi dan kerjasamanya.

Penghormatan tertinggi kepada kedua orang tua tercinta Bapak Kasiyo dan Ibu Ratna atas segala cinta kasihnya dalam mendidik dan membesarkan saya. Kepada suami tercinta, Mas Dedi, serta ananda tersayang (Hilman, Sofia, dan Hadi) yang selalu sabar dan selalu menjadi penghibur di sela-sela kesibukan. Terimakasih kepada Ibu dan Bapak (alm) mertua serta adik-adik tersayang atas segala doa dan dukungannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Andika, R., **Astuti, W.**, Syafridi, & Nurjaman, F. (2019a). Effect of flux addition and reductant type in smelting process of Indonesian limonite ore in electric arc furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 478(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/478/1/012007>
- Astuti, W.**, Andika, R., & Nurjaman, F. (2018). Effect of basicity and reductant amount in the nickel pig iron (NPI) production from Indonesian limonite ore in submerged electric arc furnace (SAF). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 285(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/285/1/012023>
- Astuti, W.**, Haryono, T., Sumardi, S., Daulay, A., Mufakhir, F. R., Supriyanta, Y. I., Prasetya, H., Nulhakim, L., Malau, N., & Petrus, H. T. B. M. (2023). *Sintesis Prekursor NMC (Nikel-Mangan-Cobalt) dari Hasil Pelindian Katalis Bekas dan Bahan Tambang dengan Metode Kopresipitasi* (Patent P00202311461). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Astuti, W.**, Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. (2015). Kinetics of nickel extraction from Indonesian saprolitic ore by citric acid leaching under atmospheric pressure. *Minerals and Metallurgical Processing*, 32(3), 176–185. <https://doi.org/10.1007/bf03402286>
- Astuti, W.**, Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. (2016a). Comparison of atmospheric citric acid leaching kinetics of nickel from different Indonesian saprolitic ores. *Hydrometallurgy*, 161, 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.12.015>

- Astuti, W.,** Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. (2016c). Comparison of effectiveness of citric acid and other acids in leaching of low-grade Indonesian saprolitic ores. *Minerals Engineering*, 85, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.001>
- Astuti, W.,** Mufakhir, F. R., Nurjaman, F., Sumardi, S., Herlina, U., Bahfie, F., & Petrus, H. T. B. M. (2021). Pengaruh Karakteristik Bijih pada Pengolahan Nikel dari Bijih Limonit Indonesia menggunakan Pelindian Atmosferik. *JMI Vol. 43 No. 1, Juni 2021 METAL INDONESIA*, 43(1), 9–16.
- Astuti, W.,** Mufakhir, F. R., Petrus, H. T. B. M., & Prasetya, A. (2020). *Proses Pelindian Senyawa Logam Lanthanum dari Katalis Bekas Industri Pengolahan Minyak Bumi Menggunakan Asam Sitrat* (Patent IDS000003319). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Astuti, W.,** Mufakhir, F. R., Setiawan, F. A., Wanta, K. C., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Leaching Characteristics of Lanthanum from a Secondary Resource Using Inorganic and Organic Acids: Emphasizing the Citric Acid Kinetics. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 241–252. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00183-9>
- Astuti, W.,** Nurjaman, F., Rofiek Mufakhir, F., Sumardi, S., Avista, D., Cleary Wanta, K., & Tri Bayu Murti Petrus, H. (2023). A novel method: Nickel and cobalt extraction from citric acid leaching solution of nickel laterite ores using oxalate precipitation. *Minerals Engineering*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107982>
- Astuti, W.,** Prilitasari, N. M., Iskandar, Y., Bratakusuma, D., & Petrus, H. T. B. M. (2018). Leaching behavior of lanthanum, nickel and iron from spent catalyst using inorganic acids. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 285(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/285/1/012007>

- Astuti, W.**, Sumardi, S., Mufakhir, F. R., Fakhruddin, M., & Kartini, E. (2023). Synthesis of manganese carbonate and manganese oxalate from Indonesian manganese ore as NMC cathode precursor. *AIP Conference Proceedings*, 2517. <https://doi.org/10.1063/5.0121479>
- Ayu Panggabean, T. K. M., Susanti, R. F., **Astuti, W.**, Murti Petrusc, H. T. B., Kristijarti, A. P., & Wanta, K. C. (2023). Utilization of the spent catalyst as a raw material for rechargeable battery production: The effect of leaching time, type, and concentration of organic acids. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(3), 459–466. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.51353>
- Bahfie, F., **Astuti, W.**, Nurjaman, F., Handoko, A. S., & Manaf, A. (2021). *Metode Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit dengan Pemanasan Dua Tahap* (Patent P00202106557). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Bahfie, F., Manaf, A., **Astuti, W.**, & Nurjaman, F. (2021a). Studies on Reduction Characteristics of Limonite and Effect of Sodium Sulphate on The Selective Reduction to Nickel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 102(1), 149–157. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00240-3>
- Bahfie, F., Manaf, A., **Astuti, W.**, Nurjaman, F., Prasetyo, E., & Sumardi, S. (2021). Study effect of Na₂SO₄ dosage and graphite on the selective reduction of saprolite from nickel grade, recovery, and iron-nickel grain size. *AIP Conference Proceedings*, 2382. <https://doi.org/10.1063/5.0060016>
- Bahfie, F., Manaf, A., **Astuti, W.**, Nurjaman, F., Suharto, S., Herlina, U., Adi, W. A., & Manawan, M. (2023). Composition of tailings after selective reduction of laterite. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 66(1), 127–132. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-127-132>

- Considine, J., Galkin, P., Hatipoglu, E., & Aldayel, A. (2023). The effects of a shock to critical minerals prices on the world oil price and inflation. *Energy Economics*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106934>
- Daulay, A., **Astuti, W.**, Mufakhir, F. R., Prasetya, H., & Samada, L. H. (2024). Chitosan grafted alginate and polyvinylpyrrolidone as the binder for porous silicon nanoparticles from coal fly ash in lithium-ion batteries. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 952. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117984>
- Daulay, A., **Astuti, W.**, Sumardi, S., Haryono, T., Mufakhir, F. R., Suyanti, & Wicaksono, M. A. (2023). *Metode Sintesis Zeolit dari Abu Terbang Batubara dengan Teknik Pelindian H₂SO₄ dan Inkubasi NaOH dan Produk yang Dihasilkannya* (Patent P00202311532). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Daulay, A., **Astuti, W.**, Sumardi, S., Mufakhir, F. R., Supriyatna, Y. I., Haryono, T., & Samada, L. H. (2024). Synthesis and characteristics of Na-A zeolite from coal fly ash and application for adsorption of cerium(III). *Journal of Rare Earths*. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.01.007>
- Geological Survey, U. (2024). *Mineral Commodity Summaries 2024*.
- Kamran, M., Raugei, M., & Hutchinson, A. (2023). Critical elements for a successful energy transition: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 4, 100068. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100068>
- Kartini, E., Fakhrudin, M., **Astuti, W.**, Sumardi, S., & Mubarak, M. Z. (2022). The study of (Ni,Mn,Co)SO₄ as raw material for NMC precursor in lithium ion battery. *AIP Conference Proceedings*, 2708. <https://doi.org/10.1063/5.0122596>

- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2023). Penetapan Jenis Komoditas yang Tergolong dalam Klasifikasi Mineral Kritis. In *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, No. 296.K/MB.01/MEM.B/2023*.
- Monirul Islam, M., Sohag, K., Mamman, S. O., & Herdhayinta, H. (2023). Response of Indonesian mineral supply to global renewable energy generation: Analysis based on gravity model approach. *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101658>
- 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 bioelaching with *Penicillium verrucosum* and *Galactomyces geotrichum*. In *Advanced Materials Research* (Vol. 825). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.825.380>
- Mufakhir, F. R., Sumardi, S., **Astuti, W.**, Prasetya, H., Daulay, A., Haryono, T., Jannah, W., Prayoga, M. N., Halim, A. Y., Ansefka, A., & Muhayaroh, E. (2023). *Metode Pengolahan Logam Tanah Jarang dari Limbah Abu Terbang Batu Bara* (Patent P00202311503). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Murti Petrus, H. T. B., Adelizar, A. S., Widiyatmoko, A., Olvianas, M., Suprpta, W., Perdana, I., Prasetya, A., & **Astuti, W.** (2019a). Kinetics of Fly Ash Geopolymerization using Semi Quantitative Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR); Corr Data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 532(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/532/1/012001>
- Murti Petrus, H. T. B., Adelizar, A. S., Widiyatmoko, A., Olvianas, M., Suprpta, W., Perdana, I., Prasetya, A., & **Astuti, W.** (2019b). Kinetics of Fly Ash Geopolymerization using Semi Quantitative

- Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR); Corr Data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 532(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/532/1/012001>
- Nugroho, N. D., Rosita, W., Perdana, I., Bendiyasa, I. M., Mufakhir, F. R., & **Astuti, W.** (2019). Iron bearing oxide minerals separation from rare earth elements (REE) rich coal fly ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 478(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/478/1/012026>
- Nurjaman, F., **Astuti, W.**, Handoko, A. S., Bahfie, F., & Suharno, B. (2022). *Metode Pembuatan Konsentrat Ferronikel dari Bijih Nikel Kadar Rendah* (Patent P00202215639). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Nurjaman, F., Handoko, A. S., Bahfie, F., **Astuti, W.**, & Suharno, B. (2021). Effect of modified basicity in selective reduction process of limonitic nickel ore. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6476–6490. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.052>
- Nurjaman, F., Saekhan, K., Bahfie, F., **Astuti, W.**, & Suharno, B. (2021). Effect of binary basicity (CaO/SiO₂) on selective reduction of lateritic nickel ore. *Periodico Di Mineralogia*, 90(2), 91–97. <https://doi.org/10.13133/2239-1002/17045>
- Nurjaman, F., Sari, Y., Manurung, P., Handoko, A. S., Bahfie, F., **Astuti, W.**, & Suharno, B. (2021). Study of Binary, Ternary, and Quaternary Basicity in Reduction of Saprolitic Nickel Ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(12), 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02391-7>
- Petrus, H. T. B. M., Bendiyasa, I. M., Anggara, F., **Astuti, W.**, Sumardi, S., & Manurung, H. (2020). *Pengolahan Logam Tanah Jarang dari Limbah Padat Abu Terbang Batubara Menggunakan AsamAsetat* (Patent P00202006702). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.

- Petrus, H. T. B. M., Bendiyasa, I. M., **Astuti, W.**, Jenie, S. N. A., Fairuza, F. I., Sa'dan, N., & Pratama, M. N. I. (2023). *Pembuatan Geopolimer dari Fly Ash dengan Pencampuran Kering Menggunakan Silika Geothermal dan NaOH sebagai Aktivator* (Patent IDP000090836). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.
- Petrus, H. T. B. M., Fairuz, F. I., Sa'dan, N., Olvianas, M., **Astuti, W.**, Jenie, S. N. A., Setiawan, F. A., Anggara, F., Ekaputri, J. J., & Bendiyasa, I. M. (2021). Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide. *Journal of Cleaner Production*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126143>
- Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., **Astuti, W.**, & Nurpratama, M. I. (2021). Valorization of Geothermal Silica and Natural Bentonite through Geopolymerization: A Characterization Study and Response Surface Design. *International Journal of Technology*, 12(1), 195–206. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i1.3537>
- Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M. F., Pratama, I. G. A. A. N., Jenie, S. N. A., **Astuti, W.**, Nurpratama, M. I., Ekaputri, J. J., & Anggara, F. (2022). Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. *Gels*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/gels8040233>
- Petrus, H. T. B. M., Putera, A. D. P., Sugiarto, E., Perdana, I., Warmada, I. W., Nurjaman, F., **Astuti, W.**, & Mursito, A. T. (2019). Kinetics on roasting reduction of limonitic laterite ore using coconut-charcoal and anthracite reductants. *Minerals Engineering*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.043>
- Petrus, H. T. B. M., Wijaya, A., Putra, A. D. P., Iskandar, Y., Bratakusuma, D., Mufakhir, F. R., **Astuti, W.**, & Wiratni. (2019). Effect of temperature and acid concentration on lanthanum extraction from spent catalyst using organic acid. *IOP Conference*

Series: Materials Science and Engineering, 478(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/478/1/012017>

- Putera, A. D. P., Warmada, I. W., Amijaya, D. H., **Astuti, W.**, Sukadana, I. G., & Petrus, H. T. B. M. (2023). A Comparison Study of Nickel Laterite Reduction using Coal and Coconut Shell Charcoal: A FactSage Simulation. *International Journal of Technology*, 14(2), 267–275. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i2.5808>
- Rezki, A. S., Sumardi, S., **Astuti, W.**, Made Bendiyasa, I., & Petrus, H. T. B. M. (2021). Molybdenum Extraction from Spent Catalyst Using Citric Acid: Characteristic and Kinetics Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 830(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/830/1/012020>
- Septiana, A., *Astuti, W.*, Soemantri Brodjonegoro No, J., Lampung, B., Lampung, P., Penelitian Teknologi Mineral -LIPI Jl Ir Sutami Km, B., Bintang, T., & Selatan, L. (2017). *Metallurgi Daur Ulang Refraktori Bekas Pakai Kiln dan Fly Ash Batu Bara dengan Variasi Tekanan Greenbody* (Vol. 3). www.ejurnalmaterialmetallurgi.com
- Surianti, S., Wanta, K. C., *Astuti, W.*, Mufakhir, F. R., Perdana, I., & Petrus, H. T. B. M. (2022). Synthesis of Nickel Oxalate from Extract Solution of Nickel Laterite Ore: Optimization and Kinetics Study. *Journal of Mining Science*, 58(3), 476–485. <https://doi.org/10.1134/S1062739122030152>
- Sutama, D. K., Prasetya, A., Petrus, H. T. B. M., & *Astuti, W.* (2021). Recovery of cobalt and molybdenum from consumed catalyst using hydrochloric acid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/882/1/012004>
- Sutijan, Petrus, H. T. M. B., Saputra, F. Y. A., *Astuti, W.*, Mufakhir, F. R., & Wanta, K. C. (2020). *Modified Gravity Separator untuk Memisahkan Cenosphere dari Fly Ash* (Patent P00202004175). Dirjen Hak Kekayaan Intelektual, Kemenkumham.

- Tajayani, I. D., Sutijan, S., Sarto, S., Petrus, H. T. B. M., & **Astuti, W.** (2023). Precipitation of Rare Earth Elements from Indonesian Coal Fly Ash Using Sodium Sulfate. In *Materials Science Forum* (Vol. 1093, pp. 105–112). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-zd4AEx>
- Vivoda, V. (2023). *Friend-shoring and critical minerals: Exploring the role of the Minerals Security Partnership*. In *Energy Research and Social Science* (Vol. 100). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103085>
- Wanta, K. C., **Astuti, W.**, Perdana, I., & Petrus, H. T. B. M. (2020). Kinetic study in atmospheric pressure organic acid leaching: Shrinking core model versus lump model. *Minerals*, 10(7), 1–10. <https://doi.org/10.3390/min10070613>
- Wanta, K. C., **Astuti, W.**, Petrus, H. T. B. M., & Perdana, I. (2022). Product Diffusion-Controlled Leaching of Nickel Laterite using Low Concentration Citric Acid Leachant at Atmospheric Condition. *International Journal of Technology*, 13(2), 410–421. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i2.4641>
- Wanta, K. C., Natapraja, E. Y., Susanti, R. F., Gemilar, G. P., **Astuti, W.**, & Petrus, H. T. B. M. (2021). Increasing of Metal Recovery in Leaching Process of Spent Catalyst at Low Temperature: The Addition Oof Hydrogen Peroxide and Sodium Chloride. *Metalurgi*, 36(2). <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v36i2.591>
- Wanta, K. C., Putra, F. D., Susanti, R. F., Gemilar, G. P., **Astuti, W.**, Virdhian, S., & Petrus, H. T. B. M. (2019). Pengaruh Derajat Keasaman (pH) dalam Proses Presipitasi Hidroksida Selektif Ion Logam dari Larutan Ekstrak Spent Catalyst. *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(2), 94. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.44007>
- Wanta, K. C., Tanujaya, F. H., Susanti, R. F., Petrus, H. T. B. M., Perdana, I., & **Astuti, W.** (2018). Studi Kinetika Proses Atmospheric

Pressure Acid Leaching Bijih Laterit Limonit Menggunakan Larutan Asam Nitrat Konsentrasi Rendah. *Jurnal Rekayasa Proses*, 12(2), 19. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.35644>

Yi, J., Dai, S., Cheng, J., Wu, Q., & Liu, K. (2021). Production quota policy in China: Implications for sustainable supply capacity of critical minerals. *Resources Policy*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102046>

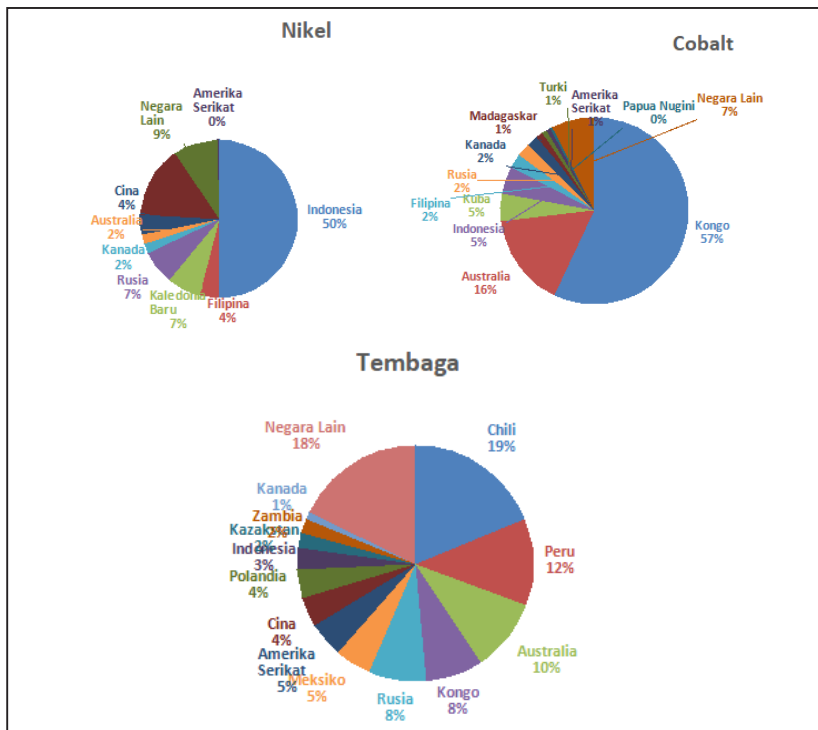
Ying Wan Loh, Azam Mohammad, Avinash Tripathi, Eben van Niekerk, & Yanto Yanto. (2023, March 1). *Advancing metals and mining in Southeast Asia with digital and analytics*. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/advancing-metals-and-mining-in-southeast-asia-with-digital-and-analytics#/>.

LAMPIRAN

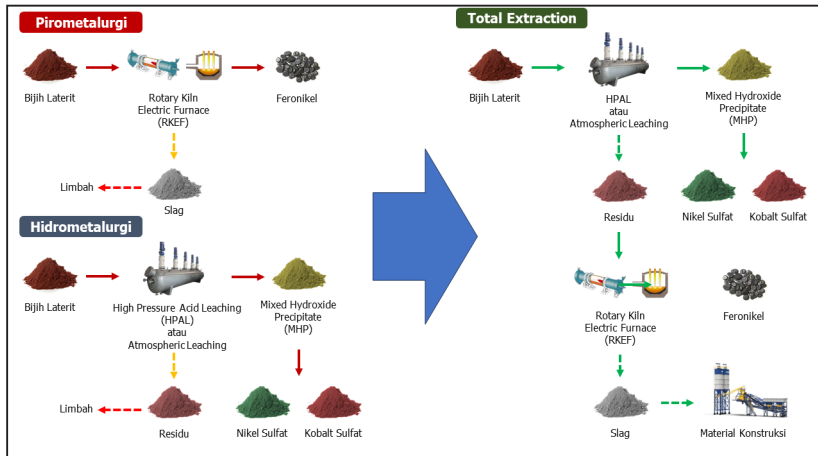
Tabel 1. Jenis Komoditas yang Tergolong dalam Klasifikasi Mineral Kritis Indonesia Menurut Keputusan Menteri ESDM Republik Indonesia No. 296.K/MB.01/MEM.B/2023

No	Mineral Kritis	Jenis Komoditas Tambang
1	Alumunium	Bauksit
2	Antimoni	Antimoni
3	Barium	Barit
4	Berilium	Berilium
5	Besi	Bijih Besi, Pasir Besi
6	Bismut	Bismut
7	Boron	Boron
8	Kadmium	Kadmium
9	Feldspar	Feldspar
10	Fluospar	Fluospar
11	Fosfor	Fosfor
12	Galena	Galena
13	Galium	Galium
14	Germanium	Germanium
15	Grafit	Grafit
16	Hafnium	Hafnium
17	Indium	Indium
18	Kalium	Kalium
19	Kalsium	Kalsium
20	Kobalt	Kobalt

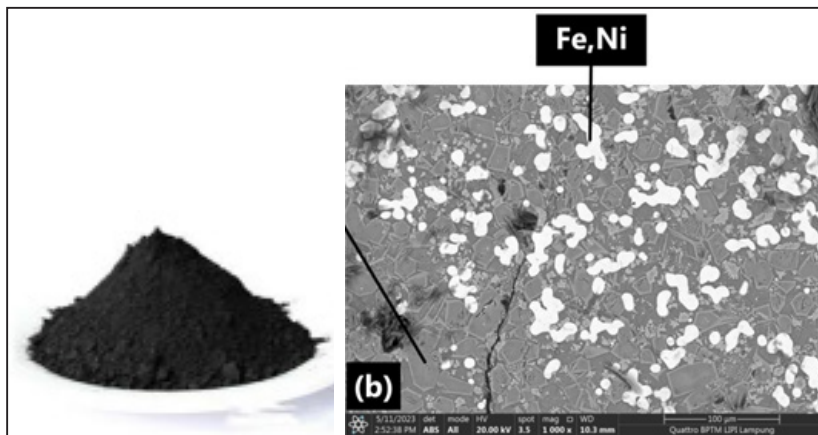
21	Kromium	Kromit
22	Litium	Litium
23	Logam Tanah Jarang	Logam Tanah Jarang
24	Magnesium	Magnesium
25	Mangan	Mangan
26	Merkuri	Sinabar
27	Molibdenum	Molibdenum
28	Nikel	Nikel
29	Niobium	Niobium
30	Palladium	Palladium
31	Platina	Platina
32	Rhutenium	Rhutenium
33	Selenium	Selenium
34	Seng	Seng
35	Silika	Pasir kuarsa, Kuarsit, Kristal kuarsa
36	Sulfur	Belerang
37	Skandium	Skandium
38	Strontium	Strontium
39	Tantalum	Tantalum
40	Telurium	Telurium
41	Tembaga	Tembaga
42	Timah	Timah
43	Titanium	Titanium
44	Torium	Torium
45	Wolfram	Wolfram
46	Vanadium	Vanadium
47	Zirkonium	Zirkon



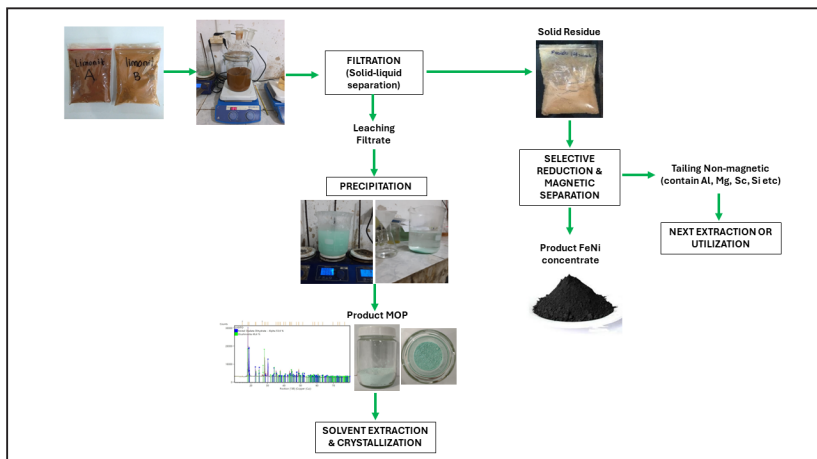
Gambar 1. Cadangan nikel, kobalt, dan tembaga di dunia tahun 2023 (Diolah dari USGS) (Geological Survey, 2024)



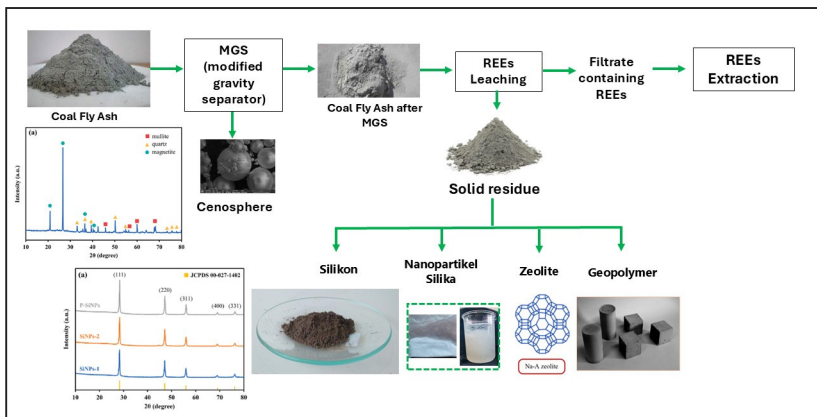
Gambar 2. Teknologi Pengolahan tuntas (*Total Extraction*) pada Bijih Nikel Laterit (Sumber: Diolah dari Astuti et al., 2023; Nurjaman et al., 2021b; Petrus, Fairuz, et al., 2021)



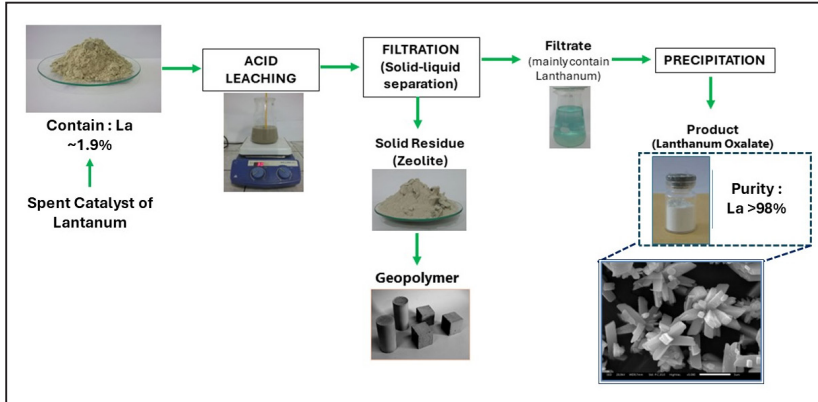
Gambar 3. Produk konsentrat FeNi dan hasil karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscope*) (Nurjaman et al., 2021b)



Gambar 4. Pengembangan Teknologi Pengolahan tuntas pada Bijih Limonit dari Halmahera (Sumber: Diolah dari Astuti et al., 2023; Nurjaman et al., 2021b))



Gambar 5. Pengolahan tuntas dari Abu Terbang Batubara (*Coal Fly Ash/CFA*) (Sumber: Diolah dari Besari et al., 2021; Dauly et al., 2023, 2024; Nugroho et al., 2019; Petrus et al., 2023; Sutijan et al., 2020; Tajayani et al., 2023b))



Gambar 6. Pengolahan tuntas dari Katalis Bekas (Sumber: Diolah dari Astuti et al., 2018, 2020; Petrus, Fairuz, et al., 2021))

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Jurnal Internasional

1. Samin, **Widi Astuti**, Herry Poernomo, Amru Daulay, Sajima, Kharistya Rozana, Synthesis of Environmentally Friendly Oxide Zirconium from Zircon Sand, *Journal of Sustainable Metallurgy* (2024) 10:903–913, <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00845-y>
2. Amru Daulay, Lukman Hakim Nasution, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, Hendra Prasetya, Studies for Extraction and Separation of Rare Earth Elements by Adsorption from Wastewater: A Review, *Mining, Metallurgy & Exploration* (2024) 41:1401–1419, <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00974-8>
3. Eka Nurfani, Lukman Nulhakim, Dwi Maulidia Muhammad, Monna Rozana, **Widi Astuti**, The enhanced sensing performance of ZnO-based photodetector by Mg doping, *Optical Materials*, 2024, Volume 148, February 2024, 114948, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.114948>.
4. Amru Daulay, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Fika Rofiek Mufakhir, Yayat Iman Supriyatna, Tri Haryono, Lukmanul Hakim Samada, Synthesis and characteristics of Na-A zeolite from coal fly ash and application for adsorption of cerium (III), *Journal of Rare Earths*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jre.2024.01.007>.

5. Amru Dauly, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Hendra Prasetya, Lukmanul Hakim Samada, Chitosan grafted alginate and polyvinylpyrrolidone as the binder for porous silicon nanoparticles from coal fly ash in lithium-ion batteries, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 952 (2024) 117984, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117984>
6. Fika R. Mufakhir, Gunawan P. Yoga, Taryono Darusman, Dwi P. Lestari, Desra Arriyadi, Rosetyati R. Utami, Slamet Sumardi, **Widi Astuti** & Hendra Prasetya, Mercury risk assessment scenarios: exposure from fish dietary behaviors of Katingan River Basin community, *International Journal of Environmental Health Research*, 2024, DOI: 10.1080/09603123.2024.2303980.
7. Danni Gathot Harbowo, Aswan, Siti Khodijah Chaerun, **Widi Astuti**, and Yahdi Zaim, Exploring Pliocene Vegetation Variability through Wood Fossil Analysis from Jasinga, Indonesia, *Tropical Natural History* 24 (2024): 31-47.
8. Fathan Bahfe, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prasetyo, Diah Susanti, Thermal Upgrading Effect: Saproliite versus Limonite, *Trans Indian Inst Met* <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03307-x>
9. Franky Michael Hamonangan Siagian, Affan Maulana, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Panut Mulyono, **Widi Astuti**, Iron Recovery from Red Mud as Zero-Valent Iron Metal Powder Using Direct Electrochemical Reduction Method, 2024, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, Vol:18, No:1, 2024.
10. Muhammad Ilham Akbar, Natasya Zahirah, Yogi Mirza Pangestu Utomo, Risnawati Risnawati, **Widi Astuti**, Fikan Mubarak Rohimsyah, Yunita Triana, Application of palm

oil frond activated carbon for biobattery electrodes, *Energy Storage*, 2023, DOI: 10.1002/est2.547.

11. **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, Dira Avista, Kevin Cleary Wanta, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, A novel method: Nickel and cobalt extraction from citric acid leaching solution of nickel laterite ores using oxalate precipitation, *Minerals Engineering 191 (2023) 107982*, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107982>.
12. Simpardin Br Ginting, Fika Rofiek Mufakhir, Ardelia Widya Santi, **Widi Astuti**, Slamet Sumardu, Hutwan Syarifuddin, Arif Rohman, Yudha Gusti Wibowo, Cr(VI)removal from aqueous solution using modified zeolite-iron chloride and its future recommendation, *Inorganic Chemistry Communications, Volume 157, November 2023*, 111273, <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111273>.
13. Venisa Mega Puteri Anggraeni, Yayat Iman Supriyatna, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Agus Prasetya, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Chandra Wahyu Purnomo, Ilmenite Sand Direct Leaching Kinetics in Hydrochloric Acid Solution, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00749-3>
14. Dian Subekti Rahayu, Yuni Kusumastuti, **Widi Astuti**, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Recycling of Electric Arc Furnace Dust Waste as a Precursor in Pharmaceutical Grade Zinc Oxide Synthesis, *Circular Economy and Sustainability*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00284-z>.
15. Yayat Iman Supriyatna, Bening Nurul Hidayah Kambuna, Salma Diasti, Andinnie Juniarsih, Slamet Sumardi, **Widi**

- Astuti**, Kurnia Trinopiawan, Riesna Prassanti, Kurnia Setiawan Widana, Agus Sumaryanto, Aditya Widian Putra, Tri Purwanti, Amalia Ekaputri Hidayat, Suci Indryati, Afiq Azfar Pratama, Roza Indra Laksmana, Rachmat Fauzi Hidayat, Neodymium upgrading of tin slag using acid leaching and multistage precipitation, *Materials Today: Proceedings*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.219>.
16. Anisa Maulidia, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Dewa Putu Agus Sudarmaja, Januarti Jaya Eka Putri, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, **Widi Astuti**, Yayat Iman Supriyatna, I Wayan Warmada, Sutijan, Ferian Anggara, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Kinetic Study of Lithium Leaching from Sidoarjo Mud Using Sulfuric Acid, *Mining, Metallurgy & Exploration* 40, 1279–1288 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00812-3>.
 17. Yayat Iman Supriyatna, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Agus Prasetya, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Eki Naidania Dida, Kinetics study of low-grade ilmenite fusion process using sodium hydroxide: Non-isothermal condition with model-free methods, *Materials Today: Proceedings*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.366>.
 18. Sutijan, Stevanus Adi Darma, Christopher Mario Hananto, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Ferian Anggara, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Shinta Virdian, Andhika Putera Utama and Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Article Lithium Separation from Geothermal Brine to Develop Critical Energy Resources Using High-Pressure Nanofiltration Technology: Characterization and Optimization, *Membranes* 2023, 13, 86, <https://doi.org/10.3390/membranes13010086>.

19. Istihanah Nurul Eskani, Edia Rahayuningsih, **Widi Astuti** and Bidhari Pidhatika, Low Temperature in Situ Synthesis of ZnO Nanoparticles from Electric Arc Furnace Dust (EAFD) Waste to Impart Antibacterial Properties on Natural Dye-Colored Batik Fabrics, *Polymers* 2023, 15, 746, <https://doi.org/10.3390/polym15030746>.
20. I Wayan Christ Widhi Herman Tangkas, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, **Widi Astuti**, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Ferian Anggara, Andhika Putera Utama, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Sutijan, Synthesis of Titanium Ion Sieves and Its Application for Lithium Recovery from Artificial Indonesian Geothermal Brine, *J. Sustain. Metall.* 9, 613–624 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00664-7>.
21. Tabita Kristina Mora Ayu Panggabean, Ratna Frida Susanti, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Anastasia Prima Kristijarti, Kevin Cleary Wanta, Utilization of Spent Catalyst as a Raw Material for Rechargeable Battery Production: Effect of time, type, and concentration of organic acids, *International Journal of Renewable Energy Development*, Vol. 12 Issue 3, 2023, 459-466, DOI:10.14710/ijred.2023.51353.
22. Bambang Suharno, Fajar Nurjaman, Soesaptri Oediyani, Anton Sapto Handoko, Fathan Bahfie, Abdul Fathir Qaulanhaq, **Widi Astuti**, Erik Prasetyo, Kinetic study in selective reduction of limonitic and saprolitic nickel ore, *Canadian Metallurgical Quarterly the Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, Volume 62, 2023 - Issue 3, <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2146951>.
23. Andreas Diga Pratama Putera, I Wayan Warmada, Donatus Hendra Amijaya, **Widi Astuti**, I Sukadana, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, A Comparison Study of Nickel Laterite

Reduction using Coal and Coconut Shell Charcoal: A FactSage Simulation, *International Journal of Technology*, 2023, Vol. 14 Issue 2, p267-275.

24. F Bahfie, A Manaf, **W Astuti**, F Nurjaman, S Suharto, U Herlina, WA Adi, M Manawan, Composition of tailings after selective reduction of laterite, *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, Vol 66 Issue 1, 127-132, 2023.
25. F Bahfie, A Manaf, **W Astuti**, F Nurjaman, E Prasetyo, Y Triapriani, D Susanti, From Nickel Ore to Ni Nanoparticles in the Extraction Process: Properties and Application, *Progress in Physics of Metals*, Vol 24, 2023, pp 173-196.
26. Fathan Bahfie, Ahmad Hidayat, Soesaptri Oediyani, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prasetyo, Ilhwan Park, Diah Susanti, Benadict Rakesh, Separation and purification of Nickel and Cobalt from pregnant leach solution by conventional vs ionic liquid as extractant: an overview, *Periodico di Mineralogia* (2023) 92, 287-306, Doi: 10.13133/2239-1002/18026
27. Kevin Cleary Wanta, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Indra Perdana, (2022). Product Diffusion Controlled Leaching of Nickel Laterite using Low Concentration Citric Acid Leachant at Atmospheric Condition, *International Journal of Technology*. Volume 13(2), pp. 410-421, 2022, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i2.4641>.
28. Sutijan, Satrio Wahyudi, Muhammad Fadlil Ismail, Pra Cipta Buana Mustika, **Widi Astuti**, Agus Prasetya, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Forward Osmosis to Concentrate Lithium from Brine: The Effect of Operating Conditions (pH and Temperature), *International Journal of Technology*.

Volume 13(1), pp. 136-146, 2022, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i1.4371>.

29. Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Sutijan, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Isana Supiah Yosephine Louis, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Effect of Operating Conditions on Lithium Recovery from Synthetic Geothermal Brine Using Electrodialysis Method, *J. Sustain. Metall.* 8, 274–287 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00488-3>.
30. Edy Sanwani, Erian Jeremy, Siti Khodijah Chaerun, Fika Rofek Mufakhir, **Widi Astuti**, Use of Mixotrophic Bacteria as Flocculating Agents to Separate Iron from Red Mud (Alumina Refinery Residue), *J. Sustain. Metall.* 8, 443–457 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00479-4>.
31. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Muhammad Olvianas, Muhammad Faiz Shafiyurrahman, I Gusti Agung Arvin Nanda Pratama, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, **Widi Astuti**, Muhammad Istiawan Nurpratama, Januarti Jaya Ekaputri and Ferian Anggara, Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study, *Gels* 2022, 8(4), 233; <https://doi.org/10.3390/gels8040233>.
32. **Widi Astuti**, Fika Rofek Mufakhir, Felix Arie Setiawan, Kevin Cleary Wanta, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, (2022). Leaching Characteristics of Lanthanum from a Secondary Resource Using Inorganic and Organic Acids: Emphasizing the Citric Acid Kinetics, *Circular Economy and Sustainability* <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00183-9>
33. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Andreas Diga Pratama Putera, I Wayan Warmada, Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**,

- Agus Prasetya, Investigation on Saprolitic Laterite Ore Reduction Process using Palm Kernel Shell Charcoal: Kinetics and Phase Transformation, *International Journal of Technology* 13(3) 565-574 (2022) doi: 10.14716/ijtech.v13i3.4701.
34. Pra Cipta Buana Wahyu Mustika, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Sutijan, Separation Characteristic and Selectivity of Lithium from Geothermal Brine Using Forward Osmosis, *Journal of Sustainable Metallurgy* 8, pp 1769–1784 (2022), ISSN 2199-3831(electronic); 2199-3823(print). <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00602-z>.
 35. Surianti, Kevin C. Wanta, **Widi Astuti**, Fika R. Mufakhir, Indra Perdana, and Himawan T. B. M. Petrus, Synthesis of Nickel Oxalate from Extract Solution of Nickel Laterite Ore: Optimization and Kinetics Study, *Journal of Mining Science*, 2022, Vol. 58, No. 3, pp. 476–485, <https://doi.org/10.1134/S1062739122030152>.
 36. F. Bahfie, A. Manaf, **W. Astuti**, F. Nurjaman, E. Prasetyo, S. Sumardi, Thermal upgrading of nickel from limonite by means of selective reduction, *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65, no. 7, pp. 471–478, DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-471-478.
 37. F. Bahfie, D. Utari Murti, A. Nuryaman, **W. Astuti**, F. Nurjaman, E. Prasetyo, S. SUDIBYO, and D. SUSANTI, Kinetic Properties of Nickel Leaching by ANOVA Method, *Progress in Physics of Metals*, 23, No. 3: 476–488, 2022, <https://doi.org/10.15407/ufm.23.03.476>.
 38. Fathan Bahfie, Muhammad Rafli Supriadi, Soesaptri Oediyani, Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**, Erik Prasetyo, Diah Susanti, Use of Monosodium Glutamate (MSG) for Green

Leaching Process: An Overview, *Periodico di Mineralogia* (2022) 91, 155-162, Doi: 10.13133/2239-1002/17756.

39. F. Bahfie, K.I. Prawijaya, S.S. Lana, F. Nurjaman, **W. Astuti**, and D. Susanti, Heat Treatment Technology for Stainless Steel 316(L), *Progress in Physics of Metals*, 23, No. 4: 729–743, 2022, <https://doi.org/10.15407/ufm.23.04.729>.
40. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prasetyo, Studies of carbon percentage variation and mixing Sapolite-Limonite in selective reduction, *Materials Today: Proceedings* 62, 2022, 4156-4160, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.679>.
41. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Studies on Reduction Characteristics of Limonite and Effect of Sodium Sulphate on The Selective Reduction to Nickel, *J. Inst. Eng. India Ser. D* 102, 149–157 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00240-3>.
42. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Faaza Ihda Fairuz, Naala Sa'dan, Muhammad Olvianas, **Widi Astuti**, S.N. Aisyiyah Jenie, Felix Arie Setiawan, Ferian Anggara, Januarti Jaya Ekaputri, I Made Bendiyasa, Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide. *Journal of Cleaner Production* 293, 126143, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126143>.
43. Istihanah Nurul Eskani, **Widi Astuti**, Farida, Agus Haerudin, Joni Setiawan, Dwi Wiji Lestari, Isnaini & Tri Widayatno, Antibacterial activities of synthesised ZnO nanoparticles applied on reactive dyed batik fabrics, *The Journal of The Textile Institute*, 113:3, 430-439, DOI: 10.1080/00405000.2021.1883907.

44. Petrus, H.T.B.M., Olvianas, M., **Astuti, W.**, Nurpratama, M.I., Valorization of Geothermal Silica and Natural Bentonite through Geopolymerization: A Characterization Study and Response Surface Design, *International Journal of Technology*, 2021, Volume 12(1), pp. 195-206, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i1.3537>.
45. Fajar Nurjaman, Idecia Amely, **Widi Astuti**, Bambang Suharno, The effect of ternary basicity ($\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$) on selective reduction of limonitic nickel ore, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8:sup2, 2022, 763-773, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1949539>.
46. Fajar Nurjaman, Anton Sapto Handoko, Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Bambang Suharno, Effect of Modified Basicity in Selective Reduction Process of Limonitic Nickel Ore, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2021, pp 6476-6490 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.052>.
47. Yayat Iman Supriyatna, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Sudibyo, Agus Prasetya, Lavita Indriyani Ginting, Yuyun Irmawati, Nining Sumawati Asri, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Correlation of Nano Titanium Dioxide Synthesis and the Mineralogical Characterization of Ilmenite Ore as Raw Material. *International Journal of Technology* 12(4), 749-759, 2021, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i4.4270>.
48. Fajar Nurjaman, Yuliana Sari, Posman Manurung, Anton Sapto Handoko, Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Bambang Suharno, Study of Binary, Ternary, and Quaternary Basicity in Reduction of Saprolitic Nickel Ore, *Transactions of the Indian Institute of Metals volume 74*, pages 3249–3263 (2021), <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02391-7>.

49. Tri Purwanti, Mochamad Setyadji, **Widi Astuti**, Indra Perdana, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Phosphate Decomposition by Alkaline Roasting to Concentrate Rare Earth Elements from Monazite of Bangka Island, Indonesia, *J Min Sci* 56, 477–485 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1062739120036763>.
50. Fajar Nurjaman, Khulud Saekhan, Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Bambang Suharno, Effect of Binary Basicity (CaO/SiO₂) on Selective Reduction of Lateritic Nickel Ore, *Periodico di Mineralogia*, 2021, 90 (2), 91-97, DOI: 10.13133/2239-1002/17045.
51. Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**, Fathan Bahfie, Bambang Suharno, Study of selective reduction in lateritic nickel ore: Saprolite versus limonite, *Materials Today: Proceedings*, 44, 2021, pp 1488-1494, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.687>.
52. Aisyiyah SN Jenie, Fransiska SH Krismastuti, Yudia P Ningrum, Anis Kristiani, Mutia D Yuniati, **Widi Astuti**, Himawan TBM Petrus, Geothermal silica-based fluorescent nanoparticles for the visualization of latent fingerprints, *Materials Express*, Volume 10, Number 2, February 2020, pp. 258-266(9), DOI: <https://doi.org/10.1166/mex.2020.1551>.
53. Kevin Cleary Wanta, **Widi Astuti**, Indra Perdana, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Kinetic Study in Atmospheric Pressure Organic Acid Leaching: Shrinking Core Model versus Lump Model. *Minerals* 2020, 10(7), 613; <https://doi.org/10.3390/min10070613>.
54. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Andreas Diga Pratama Putera, Edi Sugiarto, Indra Perdana, I Wayan Warmada,

- Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**, Anggoro Tri Mursito, Kinetics on roasting reduction of limonitic laterite ore using coconut-charcoal and anthracite reductants, *Minerals Engineering Volume 132*, 1 March 2019, Pages 126-133, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.043>.
55. Erik Prasetyo, Eti Purwaningsih, **Widi Astuti**, Selective-Reductive Leaching of Manganese from Low-Grade Manganese Ore Using Tannic Acid as Reductant. *Mining, Metallurgy & Exploration* 36, 1003–1012 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00115-6>.
56. Fajar Nurjaman, Hendri Saputra, **Widi Astuti**, Deni Ferdian, & Bambang Suharno, Ferromanganese production from the mixture of medium-grade and low-grade Indonesian manganese ore, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2018, 4:2, 296-302, DOI: 10.1080/2374068X.2017.1419411.
57. **Widi Astuti**, Tsuyoshi Hirajima, Keiko Sasaki, Naoko Okibe, Comparison of effectiveness of citric acid and other acids in leaching of low-grade Indonesian saprolitic ores. *Minerals Engineering* 85, 2016, 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.001>.
58. **Widi Astuti**, Tsuyoshi Hirajima, Keiko Sasaki, Naoko Okibe, Comparison of atmospheric citric acid leaching kinetics of nickel from Indonesian saprolitic ores, *Hydrometallurgy* 161, 2016, 138-151, <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.12.015>.
59. **Widi Astuti**, Tsuyoshi Hirajima, Keiko Sasaki, Naoko Okibe, Kinetics of nickel extraction from an Indonesian saprolitic ore by citric acid leaching under atmospheric

pressure, *Mining, Metallurgy & Exploration* 32, 176–185 (2015). <https://doi.org/10.1007/BF03402286>.

Jurnal Nasional

60. Ferian Anggara, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, I Wayan Christ Widhi Herman Tangkas, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Ilham Satria Raditya Putra, Agik Dwika Putra, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Pengaruh penambahan fly ash PLTU Cirebon dan temperatur pengeringan terhadap kuat tekan material konstruksi beton High Volume Fly Ash (HFVA), *Jurnal Rekayasa Proses* Vol 17, No 2 (2023), <https://doi.org/10.22146/jrekpros.77825>
61. Harta Haryadi, **Astuti Widi**, Chandra Edward Suryanaga, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Kajian techno-economy produk etilen dari etanol berbasis pertumbuhan dan prakiraan pasar di Indonesia, *Jurnal Rekayasa Proses* Vol 17, No 2 (2023), <https://doi.org/10.22146/jrekpros.84499>
62. Widya Hardiantika, Suprihatin, **Widi Astuti**, Tri Haryono, Istihanah Nurul Eskani, Pengaruh variasi suhu dan waktu pemanasan terhadap struktur kristal, komposisi kimia, morfologi dan kadar logam pada sintesis nanopartikel ZnO menggunakan metode hidrotermal, *Jurnal Rekayasa Proses* 17(1): 77–82, 2023, DOI 10.22146/jrekpros.77190.
63. Sutijan, Christopher Mario Hananto, Stevanus Adi Darma, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Fika Rofiek Mufakhir, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Pengaruh Variasi pH Larutan Umpan terhadap Percent Recovery Litium dari Geothermal Brine Sintesis dengan Proses Low Pressure Nanofiltration, *Metal Indonesia* 45 (1), 2023, 1-12, DOI: 10.32423/jmi.2023.v45.1-12.

64. Lukman Nulhakim, Imam Prasetyo, Monna Rozana, **Widi Astuti**, ZnO Production from EAF Solid Waste Using Hydrothermal Methods via Oxalate Precipitation, Aceh Int. J. Sci. Technol., 12(1) 53-59, 2023, doi: 10.13170/aijst.12.1.29579.
65. Ferian Anggara, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Ilham Satria Raditya Putra, Agik Dwika Putra, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Pengaruh parameter operasi terhadap persentase rekoveri litium dari sea water reverse osmosis (SWRO), Jurnal Rekayasa Proses 17(1), 2023, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.79556>.
66. Yolanda Dwika Putri, **Widi Astuti**, Donny Lesmana, Simpardin Br Ginting, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Reductive leaching of low-grade manganese ores from Way Kanan using corncob as reductant, Jurnal Rekayasa Proses 17(1): 60–65, 2023, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.70372>.
67. Dimas Bagus Galih Utomo, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, **Widi Astuti**, Fika Rofieq Mufakhir, Aron Pangihutan Christian Tampubolon, Syamsudin, Andhika Putera Utama, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Mohammad Fahrurrozi, Sutijan, Pengaruh Kondisi Operasi Proses Pemekatan Litium Dari Geothermal Brine Sintetis Dengan Metode Direct Contact Membrane Distillation (DCMD), Jurnal Rekayasa Proses 17(1): 40–48, 2023, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.79559>.
68. Vincent Sutresno Hadi Sujoto, I Wayan Christ Widhi Herman Tangkas, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Aron Pangihutan Christian Tampubolon, Syamsudin, Andhika Putera Utama, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Yuni Kusumastuti, Penentuan kondisi optimum pembuatan

silica gel menggunakan silika geothermal dengan metode sol-gel, *Jurnal Rekayasa Proses* 17(1), 2023, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.77696>.

69. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Sutijan Sutijan, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, I Wayan Christ Widhi Herman Tangkas, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Pengaruh Tegangan Operasi dan Konsentrasi Larutan Elektrolit terhadap Sintesis Timah (II) Sulfat dengan Metode Elektrolisis, *METAL INDONESIA* Vol. 44 No. 2, Desember 2022 (42-50), DOI: 10.32423/jmi.2022.v44.42-50.
70. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prastyo, Ulin Herlina, Development of Laterite Ore Processing and its Applications, *Indonesian Mining Journal*, Vol. 25 No. 2, 2022, DOI: <https://doi.org/10.30556/imj.Vol25.No2.2022.1261>.
71. Aufa Rai Adiatama, Ratna Frida Susanti, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Kevin Cleary Wanta, Synthesis and Characteristic of Nanosilica from Geothermal Sludge: Effect of Surfactant, *Metalurgi* Vol. 37 No. 2 Agustus 2022, DOI: 10.14203/metalurgi.v37i2.637.
72. Imam Junaidi, Januarti Jaya Ekaputri, Sidiq Purnomo, Ign Harry Sumartono, Winda Agustin, **Widi Astuti**, Aplikasi Mikroba dalam Agregat Buatan untuk Meningkatkan Kuat Tarik Belah Beton Mengandung Fly Ash, *Jurnal Teknik Sipil* Volume 16, No. 4, April 2022: 289-301, <https://doi.org/10.24002/jts.v16i4.5677>.
73. Erane Dio Putra, Rifqi Ikhwanuddin, Lukman Nulhakim, **Widi Astuti**, Sintesis ZnO dari Limbah Industri Logam dengan Metode Hidrotermal Menggunakan Agen

Pengendapan Asam Oksalat ($C_2H_2O_4$), JMI Vol. 43 No. 2, Desember 2021.

74. Istihanah Nurul Eskani, Euis Laela, Agus Haerudin, Joni Setiawan, Dwi Wiji Lestari, Isnaini Isnaini, **Widi Astuti**, Aplikasi nano partikel ZnO secara in situ untuk fungsionalisasi antibakteri pada kain batik, *Dinamika Kerajinan dan Batik: Majalah Ilmiah* Vol 38, No 2 (2021), DOI: 10.22322/dkb.v38i2.7451.
75. Kevin Cleary Wanta, Edward Yonathan Natapraja, Ratna Frida Susanti, Gelar Panji Gemilar, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Increasing of Metal Recovery in Leaching Process of Spent Catalyst at Low Temperature: The Addition of Hydrogen Peroxide and Sodium Chloride, *Metalurgi* (2021) 2: 77 – 86, DOI: <http://dx.doi.org/10.14203/metalurgi.v36i2.591>.
76. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Ulin Herlina, Tinjauan Teknologi Proses Pengolahan Bijih Nikel Laterit, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, Vol 17 (3), 2021, <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol17.No3.2021.1156>.
77. Kevin Cleary Wanta, Stephen Lim, Ratna Frida Susanti, Gelar Panji Gemilar, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Effect of Surfactant Type on Synthesis and Characteristics of Nanonickel Hydroxide, *Jurnal Rekayasa Proses*, Vol. 15 (2), 2021, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.69723>.
78. **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Fajar Nurjaman, Slamet Sumardi, Ulin Herlina, Fathan Bahfie, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Pengaruh Karakteristik Bijih pada Pengolahan Nikel dari Bijih Limonit Indonesia menggunakan Pelindian

Atmosferik, Metal Indonesia 43 (1), 9-16, 2021, DOI : 10.32423/jmi.2021.v43.9-16.

79. Fajar Nurjaman, Fathan Bahfie, Ulin Herlina, **Widi Astuti**, Bambang Suharno, Kajian Literatur Parameter Proses Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit, Metal Indonesia 2021, 42 (2), 63-71, DOI : 10.32423/jmi.2020.v42.63-71.
80. Kevin Cleary Wanta, Felisha Hapsari Tanujaya, Federick Dwi Putra, Ratna Frida Susanti, Gelar Panji Gemilar, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Synthesis and characterization of nickel hydroxide from extraction solution of spent catalyst, Metalurgi 35 (3), 111-118, 2020.
81. Edy Sanwani, Nuslia Bayangkara Lamandhi, Halimatul Husni, Siti Khodijah Chaerun, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Influence of indigenous mixotrophic bacteria on pyrite surface chemistry: Implications for bioflotation, Microbiology Indonesia Vol. 14 No. 1 (2020): March 2020, <https://doi.org/10.5454/mi.14.1.1>.
82. Hotden Manurung, Widya Rosita, I Made Bendiyasa, Agus Prasetya, Ferian Anggara, **Widi Astuti**, Dagus Resmana Djuanda, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Recovery of Rare Earth Elements and Yttrium from non-Magnetic Coal Fly Ash using Acetic Acid Solution, 2020, Metal Indonesia 42 (1), 35-42, DOI : 10.32423/jmi.,2020.v42.35-
83. **Widi Astuti**, Agus Haerudin, Istihanah Nurul Eskani, Aulia Pertiwi Tri Yuda, Fajar Nurjaman, Joni Setiawan, Dwi Wiji Lestari, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Pengaruh Reagen Pelindian pada Sintesis ZnO dari Debu Tungku Busur Listrik, Jurnal Rekayasa Proses 14 (1), 2020 <https://doi.org/10.22146/jrekpros.50739>.

84. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Dewi Purnama Sari, Ahmad Tawfiequrrahman Yuliansyah, Fika Rofieq Mufakhir, **Widi Astuti**, Yusuf Iskandar, Danu Bratakusuma, Shinta Virdhian, Manganese Recovery from Hydrocracking Spent Catalyst Using Citric Acid and Its Kinetics, *INSIST* Vol. 4No. 2, October 2019 (226–230), DOI:10.23960/ins.v4i2.226.
85. Fika Rofiek Mufakhir, JM Sinaga, Soesaptri Oediyani, **Widi Astuti**, Pelarutan Emas pada Pelindian Konsentrat Emas Hasil Roasting Menggunakan Reagen Tiosianat, *Jurnal Rekayasa Proses* Vol. 13, No.1, hal 24-30, 2019, DOI: 10.22146/jrekpros.41519.
86. Kevin Cleary Wanta, Federick Dwi Putra, Ratna Frida Susanti, Gelar Panji Gemilar, **Widi Astuti**, Shinta Vidhian, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Pengaruh Derajat Keasaman (pH) dalam Proses Presipitasi Hidroksida Selektif Ion Logam dari Larutan Ekstrak Spent Catalyst, *Jurnal Rekayasa Proses* Vol. 13, No. 2, 2019, hal 94-105, DOI: 10.22146/jrekpros.44007.
87. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Ardyanto Wijaya, Yusuf Iskandar, Danu Bratakusuma, Hendrik Setiawan, Wiratni Wiratni, **Widi Astuti**, Lanthanum and Nickel Recovery from Spent Catalyst using Citric Acid: Quantitative Performance Assessment using Response Surface Method, *Metalurgi* Volume 33, No. 2, 2018.
88. Ayu Septriana, Azhar Azhar, **Widi Astuti**, Daur Ulang Refraktori Bekas Kiln dan Fly Ash Batubara dengan Variasi Tekanan Greenbody, *Metalurgi* Volume 32, No. 3, 2018.
89. **Widi Astuti**, Kusno Isnugroho, Fika Rofiek Mufakhir, Ulin Herlina, Isti Nurjanah, Benefisiasi Bijih Emas dan Perak Kadar Rendah Menggunakan Palong dan Metode Flotasi, *Jurnal Rekayasa Proses*, Volume 12, No. 2, 2018, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.35483>.

90. Fajar Nurjaman, Achmad Shofi, **Widi Astuti**, Bambang Suharno, Pembuatan NPI (5-8 persen Ni) menggunakan Hot Blast Cupola Furnace Kapasitas 3 Ton/Hari, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara* Volume 14, No. 1, 2018, <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol14.No1.2018.193>.
91. Kevin Cleary Wanta, Himawan TBM Petrus, Indra Perdana, **Widi Astuti**, Uji Validitas Model Shrinking Core terhadap Pengaruh Konsentrasi Asam Sitrat dalam Proses Leaching Nikel Laterit, *Jurnal Rekayasa Proses* Volume 11, No. 1, 2017, <https://doi.org/10.22146/jrekpros.23321>.
92. Achmad Shofi, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil Thermal Hardening untuk Aplikasi Grinding Ball, *Majalah Metalurgi*, V 28.3.2013, ISSN 0216-3188/ hal 177-184.
93. **Widi Astuti**, Proses Pelunakan Air Sadah Menggunakan Zeolit Alam Lampung, *Widya Riset* Volume 8 No. 1 Tahun 2005.

Prosiding Internasional

94. Fika Rofiek Mufakhir, Virga Bagus Prayoga, Soesaptri Oediyani, **WidiAstuti**, Slamet Sumardi, Sudibyo Sudibyo, La Ode Arham, Gold dissolution: With two stages pretreatment in the thiourea system, 2024, *AIP Conf. Proc.* 3003, 020037 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0186241>.
95. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prasetyo, Study effect of carbon type of nickel extraction in thermal upgrading-selective reduction, 2024, *AIP Conf. Proc.* 3003, 020020 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0186362>.

96. Yusup Hendronursito, Kusno Isnugroho, David Candra Birawidha, Muhammad Amin, Irza Sukmana, **Widi Astuti**, Edi Suharyadi, Harsojo Harsojo, The effect of additive (SiO₂, MgO, and CaO) in the hardness and crystal phase of basalt glass-ceramics, 2024, *AIP Conf. Proc.* 3003, 020025 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0192151>.
97. Ulin Herlina, Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prasetyo, Anton Sapto Handoko, Studies effect of carbon percentage variation in thermal upgrading of mixing saprolite-limonite, 2024, *AIP Conf. Proc.* 3003, 020021 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0186062>.
98. Aulia Pertiwi Tri Yuda, Dira Avista, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Separation of nickel and cobalt from nitrate leaching solutions of laterite ore by solvent extraction using trihexyltetradecylphosphonium bis (2, 4, 4-trimethyl pentyl)phosphinate, 2024, *E3S Web Conf.* Volume 503, 2024, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450306007>.
99. D P A Sudarmaja, V S H Sujoto, C E Suryanaga, H T B M Petrus, Sutijan and **W Astuti**, Separation Performance of Lithium and Calcium from Synthetic Geothermal Brine Using Electric Field-assisted Membrane, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1275 (2023) 012011, doi:10.1088/1755-1315/1275/1/012011
100. Hendra Prasetya, Muhammad Rizki Firdaus Fasya, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, R. Gunawan Pratama Yoga, Ceng Asmarahman, Inggar Damayanti, Tri Haryono, Taryono Darusman, Dwi Puji Lestari, Desra Arriyadi, Screening potential hyperaccumulator plant for phytoremediation approach due to ASGM Activity: Study case of Katingan Regency and Tanggamus Regency, *IOP*

Conf. Series: Earth and Environmental Science 1266
(2023) 012003 doi: 10.1088/1755-1315/1266/1/012003.

101. L Nulhakim, F Zuryawan, M Rozana, and **W Astuti**, Synthesis of ZnO nanoparticle from Electric Arc Furnace (EAF) dust prepared by hydrothermal method via hydroxide Precipitation, *Journal of Physics: Conference Series* 2673 (2023) 012021, doi:10.1088/1742-6596/2673/1/012021.
102. F Febriani, T Zubaidah, Y Herbani, **W Astuti**, and C N Dewi, Revealing the rock heterogeneity in Sebau, Lombok Island by applying morphological and elemental composition analyses, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2596 012038.
103. Muhammad Syauqi, **Widi Astuti**, SN Aisyiyah Jennie, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Panut Mulyono, Modelling of Nano Silica Formation from Geothermal Silica Using Co-Precipitation Method, *Solid State Phenomena (Volume 345)*, 171-178, 2023, <https://doi.org/10.4028/p-nVH0KL>.
104. Bahfie, F., Manaf, A., **Astuti, W.**, Nurjaman, F., & Prasetyo, E. (2023). The Effect of Reductor Type in Thermal Upgrading of Limonite. In *Materials Science Forum* (Vol. 1098, pp. 131–137). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-vv7tww>
105. I Darari Tajayani, Sutijan Sutijan, Sarto Sarto, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, **Widi Astuti**, Precipitation of Rare Earth Element from Indonesian Coal Fly Ash Using Sodium Sulfate, *Materials Science Forum* 1093, 2023, pp 105-112, <https://doi.org/10.4028/p-zd4AEx>.
106. Lavita Indriani Br Ginting, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Yayat Iman Supriyatna, Fathan Bahfie, Study of Titanium Dioxide (TiO₂) Extraction Process from Ilmenite

Banten, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1201 012092, 2023, DOI 10.1088/1755-1315/1201/1/012092.

107. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Yepi Triapriani, Yayat Iman Supriyatna, Study of Graphite Stoichiometry Effect on the Selective Reduction of Saprolite to Percentage, Recovery, and Microstructure of Nickel, *AIP Conf. Proc.* 2538, 060006 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0114907>.
108. Fajar Nurjaman, Cynta Immanuela Lamandasa, Fathan Bahfie, Yuliana Sari, **Widi Astuti**, Deni Ferdian, Bambang Suharno, Effect of quaternary basicity ($\text{CaO} + \text{MgO} / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) in selective reduction of limonitic nickel ore, *AIP Conf. Proc.* 2538, 060009 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0131913>.
109. **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Fika Rofiek Mufakhir, Muhammad Fakhruddin, Evvy Kartini, Synthesis of manganese carbonate and manganese oxalate from Indonesian manganese ore as NMC cathode precursor, *AIP Conf. Proc.* 2517, 020006 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0121479>.
110. Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Yayat Iman Supriyatna, Muhammad Fakhruddin, Evvy Kartini, Effect of alkali types during iron precipitation on manganese sulfate crystallization from Indonesian manganese ore, *AIP Conf. Proc.* 2517, 020005 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0121683>.
111. Ulin Herlina, Fajar Nurjaman, Anton S Handoko, Fathan Bahfie, Erik Prasetyo, **Widi Astuti**, Yayat I Supriyatna, Preliminary characterization of laterite weight ratio on the

phase and microstructure, *AIP Conf. Proc.* 2652, 050010 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0106285>.

112. Fathan Bahfie, Ulin Herlina, Anton Sapto Handoko, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Slamet Sumardi, Fika Rofiek Mufakhir, The effect of Fe₂O₃ phase on the hydrometallurgical process of nickel laterite: A preliminary study, *AIP Conf. Proc.* 2652, 050007 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0106283>.
113. Evvy Kartini, Muhammad Fakhruddin, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Mohammad Zaki Mubarak, The study of (Ni, Mn, Co) SO₄ as raw material for NMC precursor in lithium ion battery, *AIP Conf. Proc.* 2708, 070001 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0122596>.
114. Anisa Maulidia, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Optimization of lithium extraction from mud using surface response methodology, *AIP Conf. Proc.* 2708, 070005 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0123139>.
115. FR Mufakhir, IA Yuliamsa, A Juniarsih, **W Astuti**, S Sumardi, AS Handoko, FC Alam, LO Arham, V Poernomo, HTBM Petrus, Heavy metals removal in liquid waste from spent-batteries recycling, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1017 (2022) 012004 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1017/1/012004.
116. S Sumardi, FR Mufakhir, YI Supriyatna, **W Astuti**, AS Handoko, A Febrisiantosa, W Agustina, DN Surahman, processing industrial iron waste into ferrous sulfate as an iron fortification: A preliminary study, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1017 (2022) 012029 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1017/1/012029.

117. Soesaptri Oediyani, Tiara Triana, Fitri Viviyana, Fika Rofiek Mufakhir, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Gold Adsorption from Pregnant Thiocyanate Solution Using Activated Carbon, *Materials Science Forum*, 2022, ISSN: 1662-9752, Vol. 1057, pp 98-106, doi:10.4028/p-013rsh.
118. Okti Ulandari, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Agus Prasetya, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Synthesis of solid activator for geopolymer product from fly ash and sodium hydroxide, *AIP Conf. Proc.* 2338, 040006 (2021), <https://doi.org/10.1063/5.0066649>.
119. DAA Besari, F Anggara, HTBM Petrus, **W Astuti**, WA Husnah, Effect of power plant operating conditions on fly ash and bottom ash composition: a case study from power plant in Lampung, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 851 012039, 2021, DOI 10.1088/1755-1315/851/1/012039.
120. DK Utama, A Prasetya, HTBM Petrus, **W Astuti**, Recovery of cobalt and molybdenum from consumed catalyst using hydrochloric acid, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 882 012004, 2021, DOI 10.1088/1755-1315/882/1/012004.
121. MEC Nugroho, A Prasetya, **W Astuti**, Recovery of cobalt and molybdenum from spent catalyst using citric acid, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 882 012006, 2021, DOI 10.1088/1755-1315/882/1/012006.
122. VSH Sujoto, **W Astuti**, FR Mufakhir, HTBM Petrus, Lithium recovery from synthetic geothermal brine using electrodialysis method, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 882 012003, 2021, DOI 10.1088/1755-1315/882/1/012003.

123. Amelia Sri Rezki, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, I Made Bendiyasa, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Molybdenum Extraction from Spent Catalyst Using Citric Acid: Characteristic and Kinetics Study, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 830 012020, DOI 10.1088/1755-1315/830/1/012020.
124. IWCWH Tangkas, **W Astuti**, S Sumardi, HTBM Petrus, Lithium titanium oxide synthesis by solid-state reaction for lithium adsorption from artificial brine source, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 882 012005, 2021, DOI 10.1088/1755-1315/882/1/012005.
125. Fathan Bahfie, Azwar Manaf, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Erik Prasetyo, Slamet Sumardi, Study Effect of Na₂SO₄ Dosage and Graphite on the Selective Reduction of Saprolite from Nickel Grade, Recovery, and Iron-Nickel Grain Size, *AIP Conf. Proc.* 2382, 050007 (2021), <https://doi.org/10.1063/5.0060016>.
126. IN Eskani, A Haerudin, J Setiawan, DW Lestari, **W Astuti**, Modification of cotton fabric by ZnO nanoparticles for producing an antibacterial natural dyed batik, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 462 012031, 2020, DOI 10.1088/1755-1315/462/1/012031.
127. Yayat Iman Supriyatna, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Athessia N Nainggolan, Ajeng W Ismail, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Agus Prasetya, Characterization and a Preliminary Study of TiO₂ Synthesis from Lampung Iron Sand, 2020, *Key Engineering Materials* 849, 113-118, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.849.113>.
128. **WIDI Astuti**, AGUS Haerudin, ISTIHANAH Nurul Eskani, Fajar Nurjaman, Aulia Pertiwi Tri Yuda, Joni Setiawan, Isnaeni Isnaeni, Farida Farida, Dwi Wiji Lestari, Zinc Oxide Recovery from Solid Waste of Electric Arc

Furnace Dust (EAFD) Using Hydrometallurgical Method, 2020, Key Engineering Materials 849, 108-112, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.849.108>.

129. KC Wanta, WT Gunawan, RF Susanti, GP Gemilar, HTBM Petrus, **W Astuti**, Subcritical Water as a Solvent for Extraction of Nickel and Aluminum Ions from Reforming Spent Catalysts, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 742 012025, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/742/1/012025.
130. HIMAWAN Tri Bayu Murti Petrus, HOTDEN Manurung, RIVKY Juarsa Aditya, RIFANI Amanda, **WIDI Astuti**, Bioleaching of Valuable Metals from Spent Catalyst Using Metabolic Citiric Acid by *Aspergillus niger*, 2020, Applied Mechanics and Materials 898, 23-28, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.898.23>.
131. HBTM Petrus, AE Putra, HSA Gustiana, A Prasetya, IM Bendiyasa, **W Astuti**, Gold Leaching from Printed Circuit Boards (PCBs) as one of the Urban Mine Resources using Thiosulphate: Optimization using Response Surface Methodology (RSM), *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 778 012166, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/778/1/012166.
132. Agus Prasetya, Winayu Mutiara Ahsa, Himmah Sekar Eka Ayu Gustiana, **Widi Astuti**, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Effect of Particle Size and Shaking Speed on Enhancing Concentration of Manganese using Shaking Table, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 742 012027, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/742/1/012027.
133. AS Adelizar, M Olvianas, DM Adythia, MF Syafiurrahman, IGAAN Pratama, **W Astuti**, HTBM Petrus, Fly Ash and Bottom Ash Utilization as Geopolymer: Correlation on Compressive Strength and Degree of

Polymerization Observed using FTIR, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 742 012042, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/742/1/012042.

134. AN Utami, MA Permatasari, IM Bendiyasa, **W Astuti**, HTBM Petrus, Valuable Metals Precipitation of Low-Grade Nickel Ore Leachate Using Sodium Hydroxide, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 742 012043, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/742/1/012043.
135. Pramesti Prihutami, Wahyudi Budi Sediawan, **Widi Astuti**, Agus Prasetya, Effect of Temperature on Rare Earth Elements Recovery from Coal Fly Ash Using Citric Acid, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 742 012040, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/742/1/012040.
136. IN Eskani, A Haerudin, J Setiawan, DW Lestari, **W Astuti**, Application of ZnO nanoparticles for producing antibacterial batik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 722 012029, 2020, DOI 10.1088/1757-899X/722/1/012029.
137. HSEA Gustiana, IM Bendiyasa, Agus Prasetya, FR Mufakhir, **W Astuti**, HTBM Petrus, The kinetic study of limonitic low grade nickel ore leaching using hydrochloric acid, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012009, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012009.
138. E Prasetyo, E Purwaningsih, **W Astuti**, On the determination of manganese in the presence of iron in pregnant leach solution using derivative spectrophotometry, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012022, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012022.

139. HTBM Petrus, A Wijaya, ADP Putra, Y Iskandar, D Bratakusuma, FR Mufakhir, **W Astuti**, Effect of temperature and acid concentration on lanthanum extraction from spent catalyst using organic acid, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012017, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012017.
140. R Andika, **W Astuti**, F Nurjaman, Effect of flux addition and reductant type in smelting process of Indonesian limonite ore in electric arc furnace, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012007, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012007.
141. R D Anggraeni, Agus Prasetya, HTBM Petrus, RB Cahyono, S Sumardi, **W Astuti**, Performance of Kulon Progo low grade manganese ore leaching using acetic acid and its selectivity, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012008, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012008.
142. **W Astuti**, FR Mufakhir, E Prasetyo, APT Yuda, S Sumardi, F Nurjaman, YI Supriyatna, AS Handoko, Effect of ore mineralogy on the reductive leaching of manganese ores, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012014, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012014.
143. ND Nugroho, W Rosita, I Perdana, IM Bendiya, FR Mufakhir, **W Astuti**, Iron bearing oxide minerals separation from rare earth elements (REE) rich coal fly ash, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012026, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012026.
144. FR Mufakhir, **W Astuti**, E Purwaningsih, E Prasetyo, S Sumardi, AS Handoko, A Junaedi, NM Prilitasari, YI Supriyatna, Characterization of gold ore from Tanggamus mine Lampung Province, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 478 012018, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/478/1/012018.

145. **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Erik Prasetyo, Slamet Sumardi, Aulia Pertiwi Tri Yuda, Fajar Nurjaman, Yayat Iman Supriyatna, Anton Sapto Handoko, Reductive-atmospheric leaching of manganese from pyrolusite ore using various reducing agents, *AIP Conf. Proc.* 2097, 030117 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5098292>.
146. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Arie Satya Adelizar, Achmad Widiyatmoko, Muhammad Olvianas, Wisnu Suprpta, Indra Perdana, Agus Prasetya, **Widi Astuti**, Kinetics of Fly Ash Geopolymerization using Semi Quantitative Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR); *Corr Data, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 532 012001, 2019, DOI 10.1088/1757-899X/532/1/012001.
147. **W Astuti**, R Andika, F Nurjaman, Effect of basicity and reductant amount in the nickel pig iron (NPI) production from Indonesian limonite ore in submerged electric arc furnace (SAF), *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 285 012023, 2018, DOI 10.1088/1757-899X/285/1/012023.
148. **W Astuti**, NM Prilitasari, Y Iskandar, D Bratakusuma, HTBM Petrus, Leaching behavior of lanthanum, nickel and iron from spent catalyst using inorganic acids, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 285 012007, 2018, DOI 10.1088/1757-899X/285/1/012007.
149. HBTM Petrus, Kevin Cleary Wanta, H Setiawan, Indra Perdana, **W Astuti**, Effect of pulp density and particle size on indirect bioleaching of Pomalaa nickel laterite using metabolic citric acid, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 285 012004, 2018, DOI 10.1088/1757-899X/285/1/012004.

150. **W Astuti**, S Novita, F Nurjaman, Reduction mechanism of Indonesian limonite ore by solid reducing agents, *J. Phys.: Conf. Ser.* 817 012063, 2017, DOI 10.1088/1742-6596/817/1/012063.
151. F Nurjaman, F Bahfie, **W Astuti**, A Shofi, The effect of solid solution treatment on the hardness and microstructure of 0.6%wt C-10.8%wt Mn-1.44%wt Cr austenitic manganese steel, *J. Phys.: Conf. Ser.* 817 012066, 2017, DOI 10.1088/1742-6596/817/1/012066.
152. **Widi Astuti**, Tsuyoshi Hirajima, Keiko Sasaki, Naoko Okibe, Utilization of metabolic citric acid from *Aspergillus niger* using corn starch in the nickel leaching of Indonesian saprolitic ore, *Advanced Materials Research*, Vol. 1130, 2015, pp. 251-254, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.251>
153. M Zaki Mubarak, **Widi Astuti**, Siti Khodijah Chaerun, 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*, Vol. 825, 2013, pp. 380-383, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.825.380>.

PROSIDING NASIONAL

154. Fatma Putrinta Devi, Delfimelinda Nurul Riyadi, Firman Kurniawansyah, Himawan TBM Petrus, **Widi Astuti**, Achmad Roesyadi, Pembuatan Glukosa dan Sukrosa dari Rumput Laut dengan Metode Hidrolisa Menggunakan

Katalis SiO₂, Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan, Vol 1 (1), 2020, 487-492.

155. Istihanah Nurul Eskani, Agus Haerudin, Joni Setiawan, Farida Farida, Isnaini Isnaini, Dwi Wiji Lestari, **Widi Astuti**, Ketahanan Sifat Antibakteri Kain Batik Teraplikasi Nanopartikel ZnO, Seminar Nasional Teknik Kimia" Kejuangan", 2020, hal. 6.
156. Istihanah Nurul Eskani, Agus Haerudin, Joni Setiawan, Dwi Wiji Lestari, **Widi Astuti**, Batik fungsional sebagai salah satu strategi pengembangan industri batik dalam memasuki era industri 4.0, Prosiding Seminar Nasional Industri Kerajinan Dan Batik, Vol. 1 (1), 2019.
157. Himmah Sekar Eka Ayu Agustina, I MAde Bendiyasa, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Fika Rofiek Mufakir, **Widi Astuti**, Pelindian Nikel dari Bijih LimonitLow-Grade Pomalaa Menggunakan Pelarut Asam Asetat, Seminar Nasional Teknik Kimia" Kejuangan", 2018.
158. Dewi Purnama Sari, Ahmad Tawfiequrahman, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Fika Rofiek Mufakir, **Widi Astuti**, Y Iskandar, D Bratakusuma, Valuable metals extraction from hydrocracking spent catalyst using citric acid, Seminar Nasional Teknik Kimia" Kejuangan", 2018.
159. Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**, Marsas Nurbaiti, Bambang Suharno, Uji Performa Laboratory Ball Mill Unit Terhadap Berbagai Jenis Batuan Mineral, Seminar Material Metalurgi 2012.
160. Fajar Nurjaman, Bambang Suharno, **Widi Astuti**, Myrna Aryati, Karakteristik Grinding Ball Impor Asal India dan China, Seminar Nasional Material dan Metalurgi V 2012.

161. **Widi Astuti**, M. Zaki Mubarak, Siti Khodijah Chaerun, Prospek Fungal Bioleaching untuk Pengolahan Bijih Nikel Laterit di Indonesia, Seminar Material dan Metalurgi 2011.
162. **Widi Astuti**, Agus Junaedi, Eni Suryani, Rachman Ismail, Penurunan Kadar Asam Lemak Bebas Minyak Kelapa Sawit (CPO) Menggunakan Zeolit Alam Lampung, Seminar Nasional 2006 Iptek Solusi Kemandirian Bangsa.

Daftar Paten

Paten Tersertifikasi

163. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, I Made Bendiyasa, **Widi Astuti**, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Faaza Ihda Fairuza, Naala Sa'dan, M. Istiawan Nur Pratama, Pembuatan Geopolimer dari Fly-Ash dengan Pencampuran Kering menggunakan Silika Geothermal dan NaOH sebagai Aktivator, No Paten IDP000090836.
164. Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Fauzan Aulia, Fransiska Sri Herwahu Krismastuti, Rizna Triana Dewi, Nina Artanti, Linar Zalarin Udin, **Widi Astuti**, Mutia Dewi Yuniati, Yuni Kusumastuti, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Proses Pembuatan Nanopartikel Silika Berfluoresensi dari Limbah Lumpur Silika Alam dan Metode Penggunaannya, No Paten IDP000074222.
165. **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, Erik Prasetyo, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Agus Prasetya, Proses Produksi Mangan Oksida dari Bahan Mengandung Mangan Menggunakan Asam Sitrat, No. Paten IDS000003099.
166. **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Agus Prasetya, Proses Pelindian Senyawa

Logam Lanthanum dari Katalis Bekas Industri Pengolahan Minyak Bumi Menggunakan Asam Sitrat, No. Paten IDS000003319.

167. Erik Prasetyo, **Widi Astuti**, Eti Purwaningsih, Metode Pelindian Mangan Menggunakan Tanin dan Asam Tanat, No. Paten IDS000003375
168. Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**, Anton Sapto Handoko, Slamet Sumardi, Achmad Shofi, Hammer Berbahan Dasar Baja Paduan dan Proses Pembuatannya, No. Paten IDP000064684.

Paten Terdaftar

169. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Agus Prasetya, Ferian Anggara, Muhammad Miftahur Rahman, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Ratna Frida Susanti, Akmal Irfan Majid, **Widi Astuti**, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Firman Kurniawansyah, Yayat Iman Supriyatna, Retno Wijayanti, Siti Rochani, Sariman, Ekstraksi Logam Silikon dari Silika Geothermal dengan Metode Elektrolisis, No. Paten P00202401393
170. Anis Kristiani, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, **Widi Astuti**, Fauzan Aulia, Luthfiana Nurul Hidayati, Deliana Dahnum, Adid Adep Dwiarmoko, Nino Rinaldi, Sudiarmanto, Robert Ronal Wijaya, Edi Supriadi, Proses Pembuatan Nanopartikel Zirkonia dari Ikutan Tambah Timah dan Karakteristik Produk yang Dhasilkan, No. Paten P00202401902.
171. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Sutijan, Ferian Anggara, Haryo Edi Wibowo, Agung Harijoko, **Widi Astuti**, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Dewa Putu Agus Sudarmaja, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Chandra, Edward

Suryanaga, Andhika Putera Utama, Supremlehaq Taqwim, Pengolahan Litium dari Brine dengan Metode Electro-Nanofiltration, No. Paten P00202307521.

172. Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Hendra Prasetya, Amru Daulay, Tri Haryono, Wirdatul Jannah, Muhammad Nurega Prayoga, Ahmad Yusron Halim, Andre Ansefka, Eroh Muhayarah, Metode Ekstraksi Logam Tanah Jarang dari Limbah Abu Terbang Batu Bara, No. Paten P00202311503.
173. Amru Daulay, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Tri Haryono, Fika Rofiek Mufakhir, Suyanti, Mahruri Arif Wicaksono, Metode Sintesis Zeolit sari Abu Terbang Batubara dengan Teknik Pelindian H_2SO_4 dan Inkubasi $NaOH$ Beserta Karakteristik Produk Yang dihasilkannya, No. Paten P00202311532.
174. Yayat Iman Supriyatna, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Anton Spto Handoko, Sudibyo, Ika Maria Ulfah, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Tungku Putar Listrik, No. Paten P00202309738.
175. Yusup Hendronursito, Kusno Isnugroho, **Widi Astuti**, Harsojo Sabarman, Metode Untuk Menurunkan Kadar Besi Oksida Pada Batuan Basal, No. Paten S00202309827.
176. **Widi Astuti**, Tri Haryono, Slamet Sumardi, Amru Daulay, Fika Rofiek Mufakhir, Yayat Iman Supriyanta, Hendra Prasetya, Lukman Nulhakim., Normita Malau, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Sintesis Prekursor NMC (Nikel-Mangan-Kobalt) dari Hasil Pelindian Katalis Bekas dan Bahan Tambang dengan Metode Kopresipitasi, No. Paten P00202311461.

177. Suyanti, Nur Dewi Pusporini, Rahmatika Alfia Amiliana, **Widi Astuti**, Herry Poernomo, Muzakky, Devi Swasti Prabasiwi, Kharista Rozana, Yayat Iman Supriyatna, Metode Pengolahan Pasir Ilmenit Menjadi Titanium Dioksida (TiO_2) Anatase, No. Paten P00202311543.
178. **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, Dira Avista, Metode Pengolahan Campuran Nikel dan Kobalt dari Bijih Nikel Laterit dengan Pelindian dan Penggunaan Asam Sitrat dan Asam Oksalat untuk Pengendapan Selektif, No. Paten P00202204237.
179. Fika Rofiek Mufakhir, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Anton Sapto Handoko, Sudiby, Dian Anggreini, Aldojasrico, Dira Avista, Proses Perolehan Kembali Logam-Logam Berharga dari Baterai Bekas dengan Pelindian Menggunakan Asam Organik dan Reduktor, No. Paten P00202214934.
180. Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Anton Sapto Handoko, Ulin Herlina, Fika Rofiek Mufakhir, Savet Shierly Lana, KMS Imam Prawijaya, Metode Pengerasan pada Baja Tahan Karat dengan Pengerasan Siklik dan Penambahan Karbon, No. Paten P00202206966.
181. Fajar Nurjaman, **Widi Astuti**, Anton Sapto Handoko, Fathan Bahfie, Bambang Suharno, Metode Pembuatan Konsentrat Ferronikel dari Bijih Nikel Kadar Rendah, No. P00202215639.
182. Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Suharto, Ulin Herlina, Wisnu Ari Adi, Azwar Manaf, Maykel T.E. Manawan, Pengolahan Besi dengan Metode Pelindian Alkali, No. Paten P00202209123.

183. **Widi Astuti**, Dira Avista, Fajar Nurjaman, Slamet Sumardi, Fika Rofiek Mufakhir, Yayat Iman Supriyatna, Tri Haryono, Istihanah Nurul Eskani, Metode Sintesis Nanopartikel ZnO dari Limbah Serbuk Mengandung Seng, No. Paten P00202212310.
184. Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Slamet Sumardi, Erik Prasetyo, Ulin Herlina, Anton Sapto Handoko, Wisnu Ari Adi, Azwar Manaf, Maykel T.E. Manawan, Pengolahan Logam Tanah Jarang dengan Pelindian Basa Organik, No. Paten P00202212324.
185. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Vincent Sutresno Hadi Sujoto, Sang Kompiang Wirawan, Ferian Anggara, Esti Handini, **Widi Astuti**, Kevin Cleary Wanta, Pembuatan prototipe Timah (ii) Sulfat (SnSO_4) dengan menggunakan metode elektrolisis, No. Paten P00202110047.
186. Fathan Bahfie, **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Anton Sapto Handoko, Azwar Manaf, Metode Reduksi Selektif Bijih Nikel Laterit dengan Pemanasan Dua Tahap, No. Paten P00202106557.
187. **Widi Astuti**, Fajar Nurjaman, Slamet Sumardi, Fika Rofiek Mufakhir, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Surianti, Metode Pengolahan Nikel dari Bijih Nikel Laterit dengan Pengendapan Bertingkat, No. Paten P00202006898.
188. **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Fika Rofiek Mufakhir, Yayat Iman Supriyatna, Fajar Nurjaman, Ulin Herlina, Metode Pembuatan Mangan Oksida dari Bijih Mangan Menggunakan Asam Oksalat, No. Paten P00202006899.
189. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, I Made Bendiyasa, Ferian Anggara, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Hotden Manurung, Pengolahan Logam Tanah Jarang dari Limbah

Padat Abu Terbang Batubara Menggunakan Asam Asetat, No. Paten P00202006702.

190. Sutijan, Himawan Tri Bayu Murti Petrus, Febry Yulindra Abdi Saputra, **Widi Astuti**, Fika Rofiek Mufakhir, Kevin Cleary Wanta, Modified Gravity Separator untuk Memisahkan Cenosphere dari Fly Ash, No. Paten P00202004175.
191. Himawan Tri Bayu Murti Petrus, I Made Bendiyasa, **Widi Astuti**, Siti Nurul Aisyiyah Jenie, Faaza Ihda Fairuza, Naala Sa'dan, M. Istiawan Nur Pratama, Pembuatan Geopolimer dari Fly-Ash dengan Pencampuran Kering Menggunakan Silika Geotermal dan NaOH Sebagai Aktivator, No. Paten P00202003395.
192. Fika Rofiek Mufakhir, **Widi Astuti**, Slamet Sumardi, Sudibyo, Anton Sapto Handoko, Jone Maima Sinaga, Metode Pelindian Bijih Emas Refraktori Menggunakan Thiosianat, No. Paten P00201910032.
193. Yayat Iman Supriyatna, Slamet Sumardi, **Widi Astuti**, Athessia Naomi Nainggolan, Yesi Aristanti, Sudibyo, Sintesis Nano-TiO₂ dari Mineral yang Mengandung Titanium, No. Paten P00201909996.
194. Fajar Nurjaman, Achmad Shofi, **Widi Astuti**, Sudibyo, Nurbaiti Marsas Prilitasari, Slamet Sumardi, Fathan Bahfie, Bambang Suharno, Tungku Kupola Udara Panas dengan *Ceramic Recuperator*, No. Paten S00201705824.
195. Fajar Nurjaman, Adil Jamali, **Widi Astuti**, Tungku Siklon Turbulen, No. Paten S00200900246.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama	: Dr.Eng. Widi Astuti
Tempat/Tanggal Lahir	: Cilacap, 19 Agustus 1978
Anak ke	: 1 dari 3 Bersaudara
Nama Ayah Kandung	: Kasiyo
Nama Ibu Kandung	: Ratna
Nama Istri	: Dedi Winarko
Jumlah Anak	: 3 Orang
Nama Anak	: Hilman Ganendra Nayottama Sofia Anindya Maheswari Hadi Pramudya Daneswara
Nama Instansi	: Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	: Pengembangan Teknologi Pengolahan tuntas (<i>Total Extraction</i>) pada Hilirisasi Mineral Kritis yang Berkelanjutan dalam Rangka Mendukung Program Transisi Energi Nasional
Ilmu	: Teknik
Bidang	: Teknik Sumber Daya Bumi (<i>Earth Resources Engineering</i>)
Kepakaran	: Metalurgi Proses
No. SK Pangkat Terakhir	: Keppres RI No 10/K Tahun 2024, tanggal 17 Mei 2024

No. SK Peneliti Utama : Nomor 38/M Tahun 2023, tanggal
18 September 2023

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT	Kota/Negara	Tahun Lulus
1	SD	SDN 1 Kalikudi	Cilacap, Jawa Tengah	1990
2	SMP	SMPN 1 Maos	Cilacap, Jawa Tengah	1993
3	SMA	SMAN 1 Cilacap	Cilacap, Jawa Tengah	1996
4	S-1	Jurusan Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada (UGM)	Yogyakarta	2001
5	S-2	Magister Rekayasa Pertambangan, Institut Teknologi Bandung (ITB)	Bandung	2011
6	S-3	Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University	Fukuoka, Jepang	2015

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	Diklat Prajabatan Gol III	Bogor	2003
2	Fungsional Peneliti Tingkat Pertama LIPI	Bogor	2004

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
3	Pelatihan Content Management System	Bandung	2003
4	Kursus Bahasa Inggris LBPP LIA Bandar Lampung	Bandar Lampung	2004- 2006
5	Diklat TOEFL Pusbindiklat LIPI	Bogor	2006
6	Workshop Kiat-Kiat Memenangkan Proyek	Bogor	2007
7	Drafting Paten Tingkat Dasar Pusat Inovasi LIPI	Serpong	2007
8	Drafting Paten Tingkat Lanjut Pusat Inovasi LIPI	Serpong	2007
9	Lokakarya Penguatan Kemampuan (PK) Bidang Komersialisasi Litbang Angkatan VII Thn 2008	Bogor	2008
10.	Intensive IELTS Preparation Course, IALF	Jakarta	2009
11.	Pelatihan Peningkatan Kemampuan Peneliti dalam Menyiapkan Proposal dan Penyajian Hasil Penelitian	Jakarta	2009
12.	Diklat Kepemimpinan IV	Bogor	2012
13.	Basic XRD Application Course	Belanda	2017
14.	Diklat Fungsional Lanjut	Bogor	2016
15.	Pelatihan Drafting Paten Tingkat Lanjut	Lampung	2018
16.	Pelatihan Electrochemical Workstation Potentiostat CORRTTEST 350 Series	Lampung	2018

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
17.	Pelatihan UV/VIS Spectrophotometer Perkin Elmer	Lampung	2018
18.	Bimtek Penulisan Artikel Ilmiah Internasional Bereputasi	Medan	2019
19.	Diklat Asesor Fungsional Peneliti	Bogor	2019
20.	Pelatihan Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-OES)	Lampung	2019
21.	Program Riset Non Gelar	NTNU, Trondheim, Norwegia	2021

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan	Tahun
1	Kepala Seksi Penambangan dan Pengolahan Mineral Logam	2010-2012
2	Kepala Seksi Pemanfaatan Teknologi	2016-2017
3	Kepala Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI	2019-2021

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Pertama III/b	1 Desember 2006
2	Peneliti Muda III/c	1 November 2008

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
3	Peneliti Muda III/d	1 Agustus 2016
4	Peneliti Madya IV/a	1 Desember 2017
5	Peneliti Ahli Madya IV/c	3 September 2021
6	Peneliti Ahli Utama IV/e	10 Oktober 2023

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Pimbagpro Telimek	Kepala UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung	2003
2	Ketua PME Satker UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung – LIPI	Kepala UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung – LIPI	2011-2012
3	Ketua PME Satker Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI	Kepala Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI	2016-2017
4	Koordinator Pusat Unggulan Iptek (PUI) Pengolahan dan Pemurnian Mineral	Kepala Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI	2017-2019
5	Ketua TP2U	Kepala Balai Penelitian Teknologi Mineral LIPI	2017-2021
6	JASSO Follow-up Research Fellowship	JASSO	2017

No.	Jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
7	The 11 th HOPE Meeting with Noble Laureates from JSPS	JSPS, Jepang	2019
8	Koordinator Tim Penyusun Naskah Akademik Grand Strategy Komoditas Mineral dan Batubara (GSKM) Tahap II	Kementerian ESDM	2022-2023
9	Anggota Tim Penyusun Renstra MIND ID	MIND ID	2023
10	Anggota Tim Penyusun Rencana Aksi Komoditas Bauksit	Fakultas Teknik UGM	2023
11.	Ketua TP2U	Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN	2022-2023
12.	Asesor Jabatan Fungsional Peneliti	Kepala BOSDM BRIN	2021-skrng
13.	Koordinator Kelris Peningkatan Nilai Tambah dan Teknoekonomi Mineral dan Batubara	Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN	2022
14.	Koordinator Kelris Peningkatan Nilai Tambah Mineral Logam Tanah Jarang (LTJ)	Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN	2023-skrng
15.	Ketua TP2U PR Teknologi Pertambangan	Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN	2022-2023

No.	Jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
16.	Reviewer Proposal RIIM	Deputi Fasilitas Riset dan Inovasi BRIN	2022- skrg
17.	Reviewer Proposal DBR	Deputi SDMI BRIN	2024
18.	Mentor Latsar CPNS BRIN	BOSDM BRIN	2022 dan 2024

F. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
1	Seminar Material dan Metalurgi 2012	Pemakalah	Serpong, Indonesia	2012
2	Seminar Nasional Material dan Metalurgi V (SENAMM V) 2012	Pemakalah	Surabaya, Indonesia	2012
3	International Symposium on Earth Science and Technology (CINEST) 2013	Pemakalah	Fukuoka, Jepang	2023
4	International Symposium on Earth Science and Technology (CINEST) 2014	Pemakalah	Fukuoka, Jepang	2014
5	International Symposium on Bio-hydrometallurgy 2015	Pemakalah	Bali, Indonesia	2015

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
6	Mineral Processing and Technology International Conference 2017 (MINEPROCET 2017)	Editor in Chief, Pemakalah	Serpong, Indonesia	2017
7	The 4th International Conference on Science, Technology, and Interdisciplinary Research 2018 (IC-STAR)	Pemakalah	Belitung, Indonesia	2018
8	The 4th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (IC-IMECE 2018)	Pemakalah	Solo, Indonesia	2018

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara/ Kota/Negara	Tahun
9	<i>Mineral Processing and Technology International Conference 2018 (MINEPROCET 2018)</i>	Pemakalah, Ketua Konferensi	Serpong, Indonesia	2018
10	The International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicle 2021 (ICB-REV 2021)	Pemakalah	Serpong, Indonesia (<i>online platform</i>)	2021

G. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1	Widya Riset	Pusbindiklat LIPI	Mitra Bestari	2018- 2019
2	Jurnal Rekayasa Proses	UGM	Mitra Bestari	2018 - skrg
3	Jurnal SPECTA	ITK	Mitra Bestari	2019 - skrg
4	Jurnal Pertambangan	UNSRI	Mitra Bestari	2019 - skrg

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
5	Jurnal Rekayasa Proses	UGM	Editorial Board	2022 - skrg
6	<i>Aceh International Journal of Science and Technology</i>	UNSYIAH	Mitra Bestari	2023
7	<i>RSC Advances (Royal Society Chemistry)</i>	RSC	Reviewer	2019-2020
8	<i>Hydrometallurgy</i>	Elsevier	Reviewer	2020 - skrg
9	<i>Minerals Engineering</i>	Elsevier	Reviewer	2020 – skrg
10	<i>Acta Geochimica</i>	BRIN	Reviewer	2020
11	<i>Arabian Journal of Chemistry</i>	FPIK-IPB	Reviewer	2020
12.	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	Elsevier	Reviewer	2020-2021
13.	<i>Indian Chemical Engineer</i>	Springer	Reviewer	2020
14.	<i>Journal of Central South University</i>		Reviewer	2020
15.	<i>Microchemical Journal</i>	Elsevier	Reviewer	2020
16.	<i>Cleaner Chemical Engineering</i>		Reviewer	2022

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
17.	<i>Journal of Sustainable Metallurgy</i>	Springer	Reviewer	2023
18.	<i>Metallurgical and Material Transactions B</i>	Springer	Reviewer	2023
19.	Prosiding ISFAP	IOP	Reviewer	2016-2021
20.	Prosiding MINEPROCET	IOP	Editor in Chief	2018
21.	Prosiding MINEPROCET	IOP	Reviewer	2018-2019
22.	Prosiding International Symposium for Sustainable Humanosphere	IOP	Reviewer	2019
23.	Prosiding ISMM	AIP	Reviewer	2021-2022

H. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	1
2	Bersama Penulis Lainnya	161
	Total	162

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Karya Tulis dalam Bahasa Indonesia	32

2	Karya Tulis dalam Bahasa Inggris	130
3	Karya Tulis dalam Bahasa lainnya	-
	Total	162

No.	Kualifikasi Publikasi	Jumlah
1.	Paten dan Hak Cipta	33
2.	Buku dan Bagian dari Buku	-
3.	Jurnal Internasional	59
4.	Jurnal Nasional	34
5.	Prosiding Internasional	60
6.	Prosiding Nasional	9
7.	Karya Tulis Ilmiah Lainnya	-
	Total	195

No.	Paten	Jumlah
1.	Bersertifikat	6
2.	Terdaftar	27
	Total	33

I. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
1.	Fajar Nurjaman	BRIN	Kopromotor S3	2019 – 2022
2.	Yayat Iman Supriyatna	BRIN	Kopromotor S3	2019 – 2023
3.	Fathan Bahfie	BRIN	Pembimbing S2 dan Kopromotor S3	2019 – 2024
4.	Yusup Hendronursito	BRIN	Kopromotor S3	2022 – skrg

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
5.	David Candra Birawidha	BRIN	Kopromotor S3	2023 – skrg
6.	Hendra Prasetya	BRIN	Mentor Latsar Peneliti Ahli Muda	2022
7.	Fika Rofiek Mufakhir	BRIN	Pembimbingan penulisan KTI	2019- 2020
8.	Slamet Sumardi	BRIN	Pembimbingan penulisan KTI	2020- 2021
9.	Amru Daulay	BRIN	Penanggungjawab Program Postdoctoral	2023
10.	Jumaeda Jatmika, Della Kharisma, Vinda Zakiyatuz Zulfa, Rafika Rahmawati, Donny Dwiputra	BRIN	Mentor Latsar Peneliti Ahli Muda	2024

Mahasiswa

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
1.	Ayu Septriana	Teknik Kimia, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2016
2.	Sinta Novita	Fisika, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2017
3.	Reza Andika	Fisika, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2017
4.	Free Art Limberty Lumban Gaol	Teknik Metalurgi dan Material, Institut Teknologi Kalimantan (ITK)	Pembimbing S-1	2019

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
5.	Yolanda Dwika Putri	Teknik Kimia, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2019
6.	Kherani Hana Pinania	Teknik Kimia, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2019
7.	Fellicia Kartika Sari	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2019-2020
8.	Fathan Bahfie	Ilmu Bahan, Universitas Indonesia	Pembimbing S-2	2019-2020
9.	Nurul Istiqomah Nainggolan	Fisika, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2022
10.	Ican Prayoga	Fisika, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2022
11.	Widya Hardiantika	Fisika, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2022
12.	Novia Rahmadiana Putri	Fisika, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2022
13.	Fajar Nurjaman	Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia	Pembimbing S-3	2019-2022
14.	Yayat Iman Supriyatna	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2019-2023
15.	Annisa Maulidia	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2020-2021

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
16.	Dian Subekti Rahayu	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2021- 2022
17.	Istihanah Nurul Eskani	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2020- skrg
18.	Iga Trisnawati	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Penguji Eksternal S-3	2020
19.	Fathan Bahfie	Ilmu Bahan, Universitas Indonesia	Pembimbing S-3	2021- skrg
20.	Lavita Indriani	Ilmu Bahan, Universitas Indonesia	Pembimbing S-2	2021- skrg
21.	Imam Prasetyo	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022
22.	Erane Dio Putra	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022
23.	Pra Cipta	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2022- skrg
24.	Shintawati	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2022- skrg
25.	Faturachman Zuryawan	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022- skrg

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
26.	Henita Br. Sitohang	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022- 2023
27.	Normita Malau	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022- 2023
28.	Yulianti Fatmawati	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022- 2023
29.	Dysa Adhalia	Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera	Pembimbing S-1	2022- 2023
30.	Angga Rudy Kurniawan	Politeknik Energi dan Pertambangan	Pembimbing D-4	2023
31.	Aulia Pertiwi Tri Yuda	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2022- skrg
32.	Dira Avista	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2023- skrg
33.	Yusup Hendronursito	Fisika, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2022- skrg
34.	RR Yunita Bayuwati	Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2022- skrg
35.	David Candra Birawidha	Ilmu Bahan, Universitas Indononesia	Pembimbing S-3	2023- skrg
36.	Mayang Khoirunnisa Rihaadatul ‘Aisy	Teknokimia Nuklir, Poltek TN	Pembimbing D-4	2023

No.	Nama	Institusi/PT	Peran/Tugas	Tahun
37.	Jihan Nabilah Yulfira	Kimia, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2023- skrg
38.	Reyhan Azarian	Kimia, Universitas Lampung	Pembimbing S-1	2023- skr
39.	Budi Setiawan	Politeknik Negeri Lampung	Pembimbing D-4	2023- skrg
40.	Hamartoni Ahadis	Ilmu Lingkungan, Universitas Lampung	Penguji Eksternal, S-3	2023
41.	Amelia Andriani	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2023- skrg
42.	Jilda Sofiana Dewi	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2023- skrg
43.	Devy Cendekia	Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-3	2024- skrg
44.	Mahruri Arif Wicaksono	Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia	Pembimbing S-3	2024- skrg
45.	Mega Muryani	Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada	Pembimbing S-2	2024- skrg
46.	Fasya Masaya Asrikania	Teknokimia Nuklir, Poltek TN	Pembimbing D-4	2024
47.	Suharto	Universitas Hasanudin	Penguji Eksternal, S-3	2024

J. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Himpunan Kimia Indonesia (HKI)	2005
2.	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	2019-2022
3.	Anggota	PPI (Perhimpunan Periset Indonesia)	2022-skrng
4.	Anggota	Prometindo (Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia)	2021-skrng
5.	Pengurus	Prometindo (Asosiasi Profesi Metalurgi Indonesia)	2021-skrng
6.	Dewan Pakar	Persatuan Insinyur Indonesia (PII), Badan Kejuruan Metalurgi (BK MG)	2021-skrng
7.	Anggota	<i>Organization for Women in Science for Developing Word (OWSD), Indonesia National Chapter</i>	2021-skrng

K. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Peneliti Terbaik LIPI	Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia	2012

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
2.	<i>Juara Ketiga Lomba Teknologi Tepat Guna Provinsi Lampung</i>	Gubernur Provinsi Lampung	2013
3.	Satyalencana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2014
4.	Finalis L'oreal for Women in Sciences	L'oreal Foundation	2016
5.	Satyalencana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2023
6.	Periset Berkinerja Tinggi Tahun 2023	Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)	2024
7	Ketua Kelompok Riset Terbaik Tahun 2023	Kepala OR Nanoteknologi dan Material – BRIN	2024
8	Fulbright Vising Scholar 2024	Fulbright-AMINEF	2024

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jin. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55901/brin-others.1321



ISBN978-602-6303-23-3

