

PENGUATAN HILIRISASI NIKEL DI INDONESIA MELALUI TEKNOLOGI SMELTER BERBASIS ENERGI HIJAU

Strengthening Indonesia's Nickel Downstream Industry through Green Energy- Based Smelter Technology

Octaviana Randrikasari^{1*}, Suwardi^{1,2}, Putri Oktariani^{1,2}, Noviana Islamiyah¹

¹Pusat Studi Reklamasi Tambang, Lembaga Riset Internasional Bidang Lingkungan dan Perubahan Iklim, Kampus IPB Baranangsiang, 16143

²Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, Dramaga, Bogor 16680

*Korespondensi: octaviana_rand@apps.ipb.ac.id

Received 05 Desember 2024, Revised 09 Desember 2024; Accepted 31 Januari 2025

Abstract

Indonesia holds the world's largest nickel reserves, estimated at 55 million tons in 2024, making it a key player in the global nickel industry. The government has enacted downstream policies, such as a ban on raw ore exports and mandated domestic processing through Ministerial Decree of Energy and Mineral Resources (ESDM) No. 17 of 2020, to maximize its potential. These policies have accelerated the development of green energy-based smelters, which aim to enhance value addition while reducing environmental impacts like carbon emissions and hazardous waste. This study explores the current conditions and future prospects of developing nickel smelters in Indonesia, focusing on the policies in place, their economic impacts, and the role of green technologies in supporting smelter development initiatives. It highlights the economic, environmental, and social benefits of green technologies in Indonesia's nickel downstream industry. Innovations such as nanotechnology, Chemical Mechanical Polishing (CMP), bioleaching, and High-Pressure Acid Leach (HPAL) show significant potential by reducing emissions, waste, and energy consumption. PT Vale Indonesia, a leading player in the industry, exemplifies this transformation through initiatives like fuel shifting, renewable energy utilization, electrification of equipment, and energy efficiency measures. Despite challenges like high costs, infrastructure limitations, and waste management issues, green smelters substantially contribute to job creation, competitiveness, and environmental preservation. Continued policy support and cross-sector collaboration are crucial. However, it's the investment in research that holds the key to overcoming these barriers and positioning Indonesia as a global leader in sustainable nickel production.

Keywords: Nickel Downstreaming, Nickel Processing, Green Smelter



PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negeri yang subur dan kaya akan hasil alamnya. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Tahun 2020, Indonesia menjadi salah satu dari 10 negara dengan kekayaan sumber daya geologi terbesar (Kurniady 2022). Kekayaan sumber daya geologi yang dimiliki Indonesia juga beragam seperti bahan galian radioaktif, bahan galian logam, bahan galian non-logam, dan bahan galian batuan serta baru bara. Hal ini disebabkan oleh kondisi regional Indonesia yang terletak di zona subduksi (Manurung dan Amanda 2020). Berdasarkan fisiografinya salah satu wilayah di Indonesia, Sulawesi Tenggara berada dalam zona Mandala Timur yang merupakan sabuk ofiolit hasil interaksi lempeng Australia dan Pasifik. Wilayah ini didominasi oleh batuan berumur kapur hingga miosen, meliputi kompleks batuan beku ultramafik-mafik, batu gamping, dan batu rijang. Mineralisasi nikel (Ni) di wilayah ini terjadi pada kompleks batuan ultramafik dan dipengaruhi oleh proses lateritisasi (Fatimah *et al.* 2023).

Nikel merupakan salah satu sumber daya mineral yang sangat melimpah di Indonesia. Pemanfaatan nikel yang ada di Indonesia bisa menjadi salah satu alasan meningkatnya pemasukan negara melalui pajak dan royalti. Berdasarkan data USGS tahun 2024, cadangan nikel di Indonesia mencapai 55,000,000 ton (USGS 2024). Indonesia menjadi negara yang memiliki cadangan nikel terbanyak dibanding negara lainnya. Namun, cadangan nikel di Indonesia tidak bisa bertahan lama jika terus menerus digerus dan dijual dalam bentuk mentah. Oleh karena itu, sejak tahun 2020, pemerintah telah mengambil langkah tegas dengan melarang ekspor bahan mentah utama di sektor pertambangan. Pasal 102 dan Pasal 103 (UU No. 3 Tahun 2020) yang sering disebut UU Minerba. Aturan ini mewajibkan pemegang Izin Usaha Pertambangan (IUP) dan Izin Usaha Pertambangan Khusus (IUPK) untuk meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral dan batubara, serta memastikan pengolahan dan pemurnian hasil tambang dilakukan di dalam negeri. Pasal 102 ayat (1) berbunyi: Wajib meningkatkan nilai tambah. Pasal 103 ayat (1) berbunyi: Wajib melakukan Pengolahan dan/atau Pemurnian Mineral hasil Penambangan di dalam negeri.

Untuk mengatasi ketergantungan pada ekspor bijih mentah, pemerintah telah mengambil langkah strategis dengan mengarahkan fokus pada hilirisasi di dalam negeri. Salah satu kebijakan kunci yang diterapkan adalah larangan ekspor bijih mentah, yang bertujuan mendorong pengolahan dan pemurnian sumber daya tambang di dalam negeri. Langkah ini tidak hanya menjadi landasan penting bagi penguatan hilirisasi sektor pertambangan, tetapi juga mendorong pertumbuhan industri berbasis sumber daya mineral yang lebih berkelanjutan. Melalui hilirisasi, Indonesia dapat memanfaatkan hasil tambangnya untuk menghasilkan produk bernilai tambah lebih tinggi, sehingga memberikan manfaat ekonomi yang lebih besar (Tangkudung dan Kaseger 2024; Wau *et al.* 2024). Hilirisasi memiliki hubungan yang kuat dengan konsep peningkatan nilai tambah dan daya saing produk. Semakin jauh proses hilirisasi suatu produk dalam aktivitas industri, semakin tinggi nilai atau harganya. Dalam perspektif ekonomi makro, semakin terintegrasi hilirisasi dalam suatu proses produksi, semakin besar kontribusinya terhadap pendapatan domestik bruto (PDB) suatu negara (Agung dan Adi 2022).

Pembangunan smelter nikel di Indonesia memainkan peran strategis dalam memastikan keberlanjutan sumber daya nikel. Smelter memungkinkan pengolahan nikel mentah menjadi produk jadi dengan nilai tambah yang lebih tinggi. Produk-produk yang dihasilkan dari smelter nikel termasuk berbagai macam logam paduan, seperti feronikel, matte nikel, dan pig iron, yang merupakan bahan baku penting dalam industri manufaktur, konstruksi, dan teknologi. Selain itu, smelter nikel juga dapat menghasilkan produk turunan yang lebih lanjut, seperti stainless steel dan baterai nikel-kadmium, yang memiliki permintaan tinggi di pasar global (Kementerian ESDM 2020). Dengan demikian, pembangunan smelter nikel tidak hanya meningkatkan nilai tambah produk, tetapi juga menciptakan peluang baru dalam diversifikasi industri dan pengembangan teknologi tinggi di Indonesia.

Investasi pada teknologi hijau menjadi prioritas untuk menarik lebih banyak investor sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan. Teknologi hijau, termasuk *smart mining*, terbukti memberikan manfaat signifikan dari segi operasional, lingkungan, dan ekonomi (Prasetio dan Hasrianti 2024). Penelitian (Maharani dan Muin 2023) menunjukkan bahwa pengelolaan *spent ore* yang merupakan ampas dari hasil pemurnian nikel dapat dijadikan media tanam yang aman bagi lingkungan. Hal ini menunjukkan potensi besar teknologi hijau dalam pengelolaan limbah tambang yang ramah lingkungan dan bernilai tambah.

Dengan demikian, penerapan teknologi hijau dalam hilirisasi nikel di Indonesia perlu diperkuat untuk mendukung keberlanjutan industri dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi kondisi terkini dan prospek masa depan pengembangan smelter nikel di Indonesia, dengan fokus pada kebijakan yang berlaku, dampak ekonomi, serta kemajuan teknologi hijau dalam mendukung inisiatif pembangunan smelter. Tujuan utama studi ini adalah untuk memberikan wawasan tentang bagaimana kebijakan hilirisasi dan penerapan teknologi hijau dapat memperkuat sektor smelter nikel di Indonesia, serta mengidentifikasi tantangan dan peluang yang ada dalam mengoptimalkan potensi sumber daya nikel secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode literatur review untuk menganalisis informasi yang relevan dari berbagai sumber, seperti artikel jurnal ilmiah, laporan pemerintah, buku, dan dokumen industri. Dengan fokus terhadap literatur yang mendukung mengenai analisis mengenai pengembangan hilirisasi nikel maupun smelter nikel berbasis teknologi hijau di Indonesia mencakup aspek kebijakan, ekonomi maupun lingkungan. Metode penulisan artikel ini melibatkan dua tahapan utama, yaitu:

Pengumpulan data sekunder

Tahapan pengumpulan data dilakukan dengan mencari dokumen-dokumen dari sumber tepercaya, seperti jurnal ilmiah yang membahas teknologi smelter, hilirisasi nikel, dan konsep teknologi hijau dalam industri tambang. Laporan industri dari perusahaan terkait juga dianalisis untuk mendapatkan gambaran operasional smelter, termasuk penerapan teknologi hijau. Selain itu, laporan resmi dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) digunakan untuk memahami data statistik dan kebijakan terkait sektor nikel di Indonesia. Artikel berita dari situs web resmi pemerintah juga ditinjau untuk memastikan informasi terkini mengenai regulasi dan implementasi kebijakan hilirisasi. Untuk memastikan kebenaran data yang diperoleh, sumber informasi yang digunakan harus berasal dari institusi atau penerbit yang memiliki reputasi yang baik dan diakui dalam bidangnya. Dengan menggunakan sumber yang tepercaya, seperti jurnal internasional yang terindeks, laporan resmi dari pemerintah, serta penerbit yang memiliki kredibilitas dalam bidang industri pertambangan, diharapkan dapat memastikan bahwa data yang diperoleh adalah valid dan dapat dipertanggungjawabkan.

Analisis data

Pendekatan deskriptif kualitatif dilakukan untuk menyusun berbagai data sekunder dan informasi yang diperoleh dari pengumpulan data untuk menggambarkan kondisi dan prospek pengembangan smelter nikel di Indonesia, evaluasi dampak ekonomi dan lingkungan dari pengembangan smelter berbasis teknologi hijau, serta tantangan dan peluang dalam penerapan teknologi hijau di industri smelter nikel di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi terkini smelter nikel di Indonesia

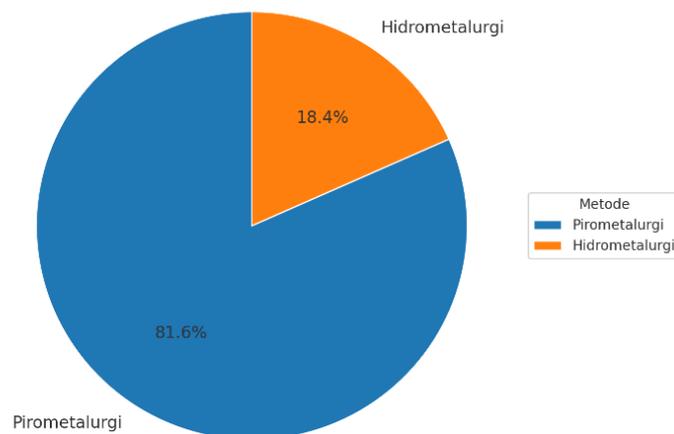
Distribusi dan kapasitas smelter

Indonesia memiliki banyak pabrik peleburan nikel, terutama terkonsentrasi di daerah yang kaya akan cadangan nikel, seperti Sulawesi dan Maluku. Saat ini, Indonesia memiliki total kapasitas 5 juta ton/tahun untuk peleburan nikel, terutama memproduksi NPI atau FeNi dengan tingkat Ni 10%, membutuhkan sekitar 40 juta ton bijih nikel, menghasilkan sekitar 30 juta ton limbah per terak setiap tahun (Nabiilah *et al.* 2019). Kapasitas peleburan nikel telah meningkat secara signifikan, didukung dengan banyak fasilitas yang dirancang untuk memproses bijih nikel dengan kandungan nikel di atas 2% (Setiawan dan Horman 2019).

Pemerintah juga telah merencanakan pembangunan 53 smelter pada tahun 2024, dengan 56,60% di antaranya merupakan smelter nikel. Namun, keberhasilan investasi di sektor ini membutuhkan kajian mendalam terhadap metode evaluasi nilai ekonomis proyek smelter. Penelitian Jalaludin *et al.* (2023) mengkaji metode evaluasi nilai ekonomis pada rencana investasi di perusahaan smelter nikel menggunakan *Fuzzy Black-Scholes ROV*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tersebut lebih praktis, mampu memperhitungkan risiko, fleksibilitas proyek, dan tetap efektif meski informasi awal proyek investasi terbatas. Metode ini menjadi alat evaluasi yang lebih adaptif untuk mendukung keberhasilan investasi di smelter nikel.

Menurut data Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi (Adi 2024 Nov 3), jumlah smelter nikel di Indonesia adalah 147 unit, terdiri atas:

- 49 smelter beroperasi dengan metode pirometalurgi
- 35 smelter sedang dalam konstruksi dengan metode pirometalurgi
- 36 smelter sedang dalam perencanaan dengan metode pirometalurgi
- 5 plan operasi dengan metode hidrometalurgi
- 3 plan konstruksi dengan metode hidrometalurgi
- 19 plan perencanaan dengan metode hidrometalurgi



Gambar 1 Proporsi smelter nikel di Indonesia berdasarkan metode yang digunakan.

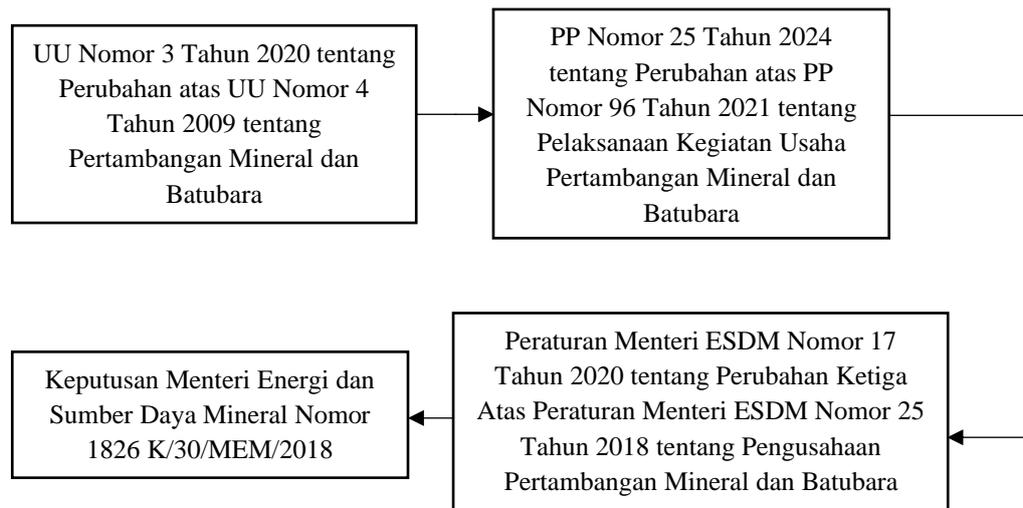
Teknologi pirometalurgi masih menjadi pilihan utama dalam pengolahan nikel di Indonesia (Gambar 1). Metode pirometalurgi memiliki kapasitas pengolahan yang lebih besar, memungkinkan untuk memproses volume bijih nikel yang lebih banyak dalam waktu yang lebih singkat, namun memiliki tantangan berupa emisi karbon yang lebih tinggi (Setiawan 2016). Proses hidrometalurgi,

seperti *High Pressure Acid Leach* (HPAL), menghasilkan emisi yang lebih rendah dan meminimalkan penggunaan bahan baku berbahaya. Hal ini dapat disebabkan oleh investasi awal yang lebih besar dan teknologi yang memerlukan infrastruktur serta keahlian lebih kompleks (Gultom dan Sianipar 2020). Bijih nikel laterit yang diolah melalui metode hidrometalurgi akan menghasilkan produk berupa nikel dan kobalt. Sementara itu, pengolahan menggunakan metode pirometalurgi menghasilkan logam dengan kandungan nikel lebih dari 15%, disertai elemen lainnya seperti krom dan kobalt (Bahfie *et al.* 2021).

Total kapasitas peleburan nikel Indonesia diproyeksikan akan meningkat secara signifikan, dengan perkiraan menunjukkan kapasitas lebih dari 1 juta ton nikel per tahun pada tahun 2025 (Abdan dan Imron 2024). Untuk mendukung ekspansi ini, Indonesia perlu mempertahankan dan meningkatkan daya saing produk olahan nikel. Selain itu, optimalisasi ekspor harus memperhatikan faktor-faktor seperti daya saing, produk domestik bruto per kapita negara tujuan serta nilai tukar negara tujuan (Widiyanti dan Saputra 2023).

Kebijakan pendukung hilirisasi

Pemerintah Indonesia telah menerapkan kebijakan wajib untuk mendorong pembangunan smelter sebagai langkah strategis dalam memproses bijih nikel di dalam negeri. Langkah ini bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada ekspor bijih nikel mentah sekaligus meningkatkan nilai tambah ekonomi melalui pengolahan mineral secara lokal. Kebijakan ini didukung oleh berbagai peraturan yang dirangkum pada Gambar 2.



Gambar 2 Peraturan mengenai hilirisasi

Selain itu, pemerintah juga mendorong pembangunan smelter untuk pengolahan bijih nikel di dalam negeri, dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024, pembangunan smelter menjadi salah satu fokus utama untuk meningkatkan nilai tambah ekonomi (Fadlillah dan Wahyuni 2023). Pemerintah Indonesia juga berencana menerapkan kebijakan untuk meningkatkan daya saing industri peleburan nikel, termasuk bea ekspor terpadu dan investasi strategis (Hanafi 2024).

Dampak hilirisasi nikel di Indonesia

Dampak ekonomi

Hilirisasi nikel di Indonesia memberikan dampak ekonomi yang signifikan. Dengan membatasi ekspor bijih mentah, hilirisasi mendorong produksi produk bernilai tambah seperti feronikel, nikel matte, stainless steel, dan baterai kendaraan listrik, yang meningkatkan daya saing global sekaligus

mengurangi ketergantungan pada ekspor bahan mentah. Proses ini juga menciptakan banyak lapangan kerja di sektor konstruksi, operasional, dan pendukung, serta meningkatkan keterampilan tenaga kerja lokal. Selain itu, larangan ekspor bijih mentah telah meningkatkan nilai ekspor hingga 263%, memperbesar cadangan devisa, dan menambah penerimaan negara melalui pajak dan royalti yang dapat dialokasikan untuk pembangunan. Hilirisasi juga memperkuat industri domestik dengan mengurangi ketergantungan impor dan membuka peluang investasi baru di sektor baterai, menjadikan Indonesia lebih mandiri secara ekonomi. Pembangunan smelter juga memicu pengembangan infrastruktur seperti pelabuhan, jalan, dan fasilitas energi, yang tidak hanya mendukung operasional industri, tetapi juga meningkatkan aksesibilitas dan kesejahteraan masyarakat (Sholeha dan Riani 2024).

Penelitian Wau *et al.* (2024) menunjukkan bahwa *downstreaming* nikel mempromosikan keberlanjutan lingkungan dengan mendorong pemrosesan lebih lanjut dan inovasi dalam pengembangan teknologi, yang tidak hanya meningkatkan pertumbuhan ekonomi tetapi juga mendukung permintaan akan teknologi domestik, menciptakan peluang kerja dan mengurangi tingkat pengangguran. Kebijakan hilirisasi nikel diproyeksikan akan terus meningkatkan pendapatan dari iuran tetap dan dapat menyumbang tambahan pendapatan royalti nikel diperkirakan hingga 14 miliar rupiah seiring dengan pertumbuhan industri nikel dalam negeri. Dengan demikian, hilirisasi nikel menjadi strategi yang efektif untuk memperkuat perekonomian nasional melalui peningkatan pendapatan negara bukan pajak (Ashar *et al.* 2024).

Dampak lingkungan

Berdasarkan konteks hilirisasi nikel di Indonesia, pendekatan *green criminology* dapat digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh industri pengolahan nikel. Penelitian (Rynaldi *et al.* 2024) menunjukkan bahwa hilirisasi tambang nikel memiliki dampak negatif, antara lain kerusakan lingkungan, gangguan kesehatan masyarakat, peningkatan konflik sosial, serta hilangnya sumber daya alam dan mata pencaharian. Pemerintah sering kali lebih memprioritaskan keuntungan ekonomi dibandingkan perlindungan lingkungan. Selain itu, pengaruh politik yang dimiliki oleh perusahaan tambang besar dapat memengaruhi kebijakan sehingga membuat pemerintah kurang responsif terhadap pelanggaran lingkungan.

Pemerintah berupaya memanfaatkan kekayaan nikel Indonesia sebagai bahan utama baterai kendaraan listrik untuk mendukung transisi energi bersih. Namun, eksploitasi ini menimbulkan dampak serius pada lingkungan. Aktivitas tambang nikel menghasilkan jutaan ton hasil tambang dan limbah tailing. Manajemen limbah tailing yang kurang optimal menyebabkan sedimentasi luas dan risiko akumulasi logam berat dalam biota laut melalui biomagnifikasi. Akibatnya, ekosistem laut, termasuk hutan mangrove dan sumber daya perikanan pesisir mengalami kerusakan yang cukup besar. Nelayan menghadapi penurunan pendapatan karena harus melaut lebih jauh untuk menangkap ikan. Deforestasi dan kerusakan ekosistem maritim yang terjadi menunjukkan bahwa upaya mendukung energi bersih tidak sebanding dengan biaya lingkungan yang ditanggung (Syarifuddin 2022).

Penambangan nikel di Sulawesi berdampak besar terhadap deforestasi. Tutupan hutan di desa-desa yang terlibat dalam penambangan nikel menurun sebesar 4,4 persen antara tahun 2011 dan 2018, hampir dua kali lipat dibandingkan dengan desa yang tidak terlibat dalam kegiatan penambangan. Selama tahap awal produksi (1-3 tahun), desa tambang mengalami deforestasi yang lebih tinggi sebesar 1,2 persen dibandingkan dengan desa tanpa penambangan, dengan tambahan deforestasi 0,4 persen pada tahun-tahun berikutnya. Kesejahteraan masyarakat lokal juga mengalami penurunan, terutama akibat degradasi lingkungan. Kesejahteraan lingkungan, yang mencakup kualitas udara dan sumber daya air, menurun sebanyak 11,3 persen pada tahap akhir produksi tambang (4-7 tahun). Perbaikan dalam infrastruktur dan standar hidup tidak sebanding dengan penurunan yang terjadi pada aspek kesehatan, hubungan sosial, dan pendidikan. Penurunan kesejahteraan lingkungan dan sosial ini menunjukkan

bahwa meskipun penambangan nikel mendukung transisi energi bersih, dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan sangat besar dan perlu mendapat perhatian lebih lanjut (Lo *et al.* 2024).

Kerusakan lingkungan yang lebih lanjut ditunjukkan oleh tingginya tingkat polusi yang mempengaruhi kesehatan masyarakat di Kabupaten Morowali. Pada tahun 2021, tercatat 2.304 kasus diare dan 271 kasus tuberkulosis, yang menunjukkan dampak polusi terhadap kesehatan masyarakat. Kecamatan Bahodopi, yang juga terdampak aktivitas pertambangan, melaporkan 439 kasus diare dan 98 kasus tuberkulosis. Pembangunan kawasan industri *Indonesia Morowali Industrial Park (IMIP)* seluas 3.000 hektar, yang terdiri dari 2.500 hektar hutan dan 500 hektar kawasan lainnya, mengakibatkan konversi langsung 2.500 hektar hutan menjadi area industri, serta 500 hektar lahan masyarakat yang sebelumnya digunakan untuk pertanian dan pemukiman kini berubah menjadi area industri. Selain itu, kerusakan pesisir sepanjang 13 kilometer, mulai dari Desa Labota hingga Desa Lalampu, menyebabkan hilangnya mangrove, peningkatan sedimentasi, dan penurunan kualitas air, yang merugikan ekosistem laut dan perikanan lokal (Taufik *et al.* 2022).

Teknologi hijau dalam pengolahan nikel

Teknologi hijau dalam pengolahan nikel merujuk pada penerapan metode dan proses yang ramah lingkungan untuk mengekstraksi, memurnikan, dan memanfaatkan nikel, dengan tujuan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan mempromosikan keberlanjutan. Teknologi ini berfokus pada efisiensi energi, pengurangan limbah, dan penggunaan bahan kimia yang aman atau biodegradable. Pengelolaan nikel di Indonesia semakin fokus pada teknologi hijau, menangani keberlanjutan lingkungan dan pertumbuhan ekonomi. Pengembangan Green Smelter merupakan inovasi yang dilakukan dalam menjalankan penambangan berkelanjutan (Dyah 2024).

Pengembangan sintesis 'hijau' nanopartikel nikel (Ni-NP) menggunakan ekstrak tumbuhan, mempromosikan keberlanjutan dan biokompatibilitas. Metode ini mendukung produksi yang lebih aman dan hemat biaya, dengan aplikasi dalam aktivitas antimikroba, pengiriman obat, dan remediasi lingkungan, menunjukkan potensi teknologi hijau dalam pemrosesan nikel (Dhakal *et al.* 2024). *Chemical mechanical polishing (CMP)* merupakan metode inovatif untuk memproses paduan nikel (*nickel alloy*) yang mengadopsi pendekatan ramah lingkungan. Berbeda dari CMP tradisional yang menggunakan slurry beracun dan mencemari lingkungan, metode baru ini memanfaatkan bahan seperti asam mandelat, hidrogen peroksida, abrasif komposit ceria-silika, dan air deionisasi. Metode CMP ramah lingkungan ini tidak hanya meminimalkan polusi lingkungan, tetapi juga membuka peluang baru untuk mendapatkan permukaan atom pada paduan nikel, yang berpotensi diaplikasikan dalam komponen berperforma tinggi (Li *et al.* 2024).

Penelitian bioleaching untuk ekstraksi nikel dari bijih kadar rendah telah dilakukan oleh berbagai institusi di Indonesia (Handayani 2020). Penelitian di Puslitbang Tekmira (Handayani dan Suratman 2017), jamur indigenus yang diisolasi dari bijih limonit, yaitu *Aspergillus sp.* dan *Penicillium sp.*, digunakan untuk mempelajari proses pelindian nikel. Berdasarkan analisis XRD, bijih limonit yang digunakan memiliki mineral utama berupa goetit dan silika. Pelindian dilakukan secara aseptik pada suhu kamar dengan kecepatan agitasi 150 rpm. *Aspergillus sp.* terbukti lebih efisien dalam melindi nikel dibandingkan *Penicillium sp.*, dengan ekstraksi nikel maksimum sebesar 57% setelah 20 hari pada konsentrasi solid 5%.

Penelitian di Institut Teknologi Bandung oleh (Astuti *et al.* 2011) juga meneliti bioleaching bijih laterit nikel dari Pomalaa, Sulawesi Tenggara, menggunakan konsorsium jamur *Penicillium veruculosum* dan *Galactomyces geotrichum* sebagai penghasil asam organik. Media pelindian menggunakan limbah tahu, tempe, dan molases untuk memproduksi asam sitrat, laktat, dan asetat. Metode ini menghasilkan ekstraksi nikel sebesar 24,5% dalam waktu satu minggu. Penelitian lain terhadap bijih limonit dari Pulau Gag (Mubarok *et al.* 2015) menggunakan konsorsium mikroba

Alicyclobacillus ferrooxidans, *Bacillus mucilaginosus*, dan *Pseudomonas putida*. Proses pelindian selama 28 hari menghasilkan ekstraksi nikel tertinggi sebesar 34,3%.

Penelitian oleh (Kurniawan 2018) meneliti bioleaching bijih laterit nikel kadar rendah menggunakan konsorsium mikroorganisme *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Acidithiobacillus thiooxidans*. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh waktu bioleaching dan rasio massa bijih terhadap pelarut. Proses bioleaching dilakukan pada suhu 37°C dengan ukuran partikel bijih 30/40 mesh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pelindian selama 60 hari dengan rasio bijih terhadap pelarut 1:20 menghasilkan ekstraksi nikel tertinggi sebesar 43%. Penelitian ini menunjukkan bahwa bioleaching merupakan metode alternatif yang ramah lingkungan dan lebih ekonomis dibandingkan pirometalurgi untuk pengolahan bijih laterit nikel kadar rendah.

Peleburan nikel menghasilkan limbah yang signifikan, termasuk terak dan limbah, yang dapat berdampak pada kualitas air lokal (Hamid *et al.* 2015). Praktik berkelanjutan dan strategi pengelolaan limbah sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan sambil memperluas operasi peleburan. teknologi hijau dalam pemrosesan nikel dengan mengubah bijih bekas menjadi media tanam yang tidak beracun, memanfaatkan teknik netralisasi dengan batu kapur dan biolit, dan memastikan tanaman pangan yang dihasilkan memenuhi standar keamanan untuk konsumsi, mempromosikan keberlanjutan lingkungan (Maharani dan Muin 2023).

Penelitian (Hardiyanto *et al.* 2023) menunjukkan bahwa PT Vale Indonesia berkomitmen untuk memitigasi pemanasan global melalui pendekatan teknologi dan reklamasi tambang. Pendekatan teknologi meliputi *fuel shifting* (mengganti batu bara dengan gas alam), *green power up* (memanfaatkan energi terbarukan seperti solar dan hidro), *equipment electrification* (mengganti mesin diesel dengan mesin listrik), dan *efficiency improvement* (mengoptimalkan efisiensi energi) bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan mendukung pencapaian Net Zero Emission pada 2060.

Tantangan dan peluang pembangunan smelter

Pembangunan smelter nikel di Indonesia menghadirkan tantangan seperti degradasi lingkungan, konflik sosial, dan pergeseran mata pencaharian bagi penduduk setempat. Namun, pembangunan smelter ini juga menawarkan peluang untuk pertumbuhan ekonomi meliputi peningkatan PDB, dan penciptaan lapangan kerja, terutama di sektor pertambangan dan jasa (Taufik *et al.* 2022). Hilirisasi nikel di Indonesia bertujuan untuk menghasilkan berbagai produk nikel, meningkatkan nilai melalui pengolahan dalam negeri. Namun, hal itu menimbulkan kekhawatiran atas keberlanjutan lingkungan, deforestasi, dan pelanggaran hak asasi manusia, terutama yang mempengaruhi masyarakat adat dan keseimbangan ekologis di daerah pertambangan (Naryono 2023).

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan smelter adalah pendanaan. Banyak perusahaan mengalami kesulitan memperoleh pinjaman besar untuk membiayai proyek smelter, sementara bank lokal sering enggan memberikan pendanaan karena keterbatasan infrastruktur listrik di beberapa lokasi pembangunan. Meskipun demikian, upaya alternatif seperti *initial public offering* (IPO), penerbitan obligasi, atau dukungan dari lembaga keuangan tetap menjadi opsi yang dapat dieksplorasi (Sucofindo 2024 Mei 27).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Indonesia memiliki potensi besar dalam industri nikel, didukung oleh cadangan nikel terbesar di dunia yang mencapai 55 juta ton pada tahun 2024. Untuk memaksimalkan potensi ini, pemerintah telah menerapkan kebijakan hilirisasi, seperti larangan ekspor bijih mentah dan pengolahan nikel di dalam negeri melalui pembangunan smelter. Pengembangan smelter berbasis teknologi hijau seperti bioleaching, CMP, dan HPAL di Indonesia adalah langkah strategis untuk meningkatkan nilai tambah

nikel sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan. Namun, tingginya biaya investasi dan keterbatasan infrastruktur menjadi tantangan signifikan yang harus diatasi untuk mewujudkan pengembangan smelter berbasis energi hijau.

Saran

1. Pemerintah dan sektor swasta perlu berinvestasi lebih besar pada riset dan pengembangan teknologi ramah lingkungan untuk meningkatkan efisiensi proses dan mengurangi limbah.
2. Kolaborasi antara pemerintah, industri, dan akademisi diperlukan untuk memastikan adopsi teknologi hijau yang luas dan berkelanjutan.
3. Pemantauan lingkungan terhadap aktivitas smelter diperlukan untuk memastikan kepatuhan terhadap standar lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdan MAW, Imron MA. 2024 Feb. Business Management and Strategic Forecasting Lens: Navigating the Future of Indonesia's Nickel Industry. *KIJECEBM*.doi:10.52458/23484969.2024.v11.iss1.kp.a1. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://www.kaavpublications.org/abstracts/business-management-and-strategic-forecasting-lens-navigating-the-future-of-indonesias-nickel-industry>
- Adi AC. 2024 Nov 3. Pemilik Cadangan Nikel dan Bauksit Terbesar di Dunia, Ini Yang Dilakukan Indonesia. *ESDM*. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/pemilik-cadangan-nikel-dan-bauksit-terbesar-di-dunia-ini-yang-dilakukan-indonesia>
- Agung M, Adi EAW. 2022. Peningkatan Investasi Dan Hilirisasi Nikel Di Indonesia. *JISIP (Jurnal Ilmu Sosial dan Pendidikan)*. 6(2).doi:10.58258/jisip.v6i2.3085. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <https://ejournal.mandalanursa.org/index.php/JISIP/article/view/3085>
- Ashar B, Pratama H, Hidayat R, Nurcahya WF. 2024. Dampak Kebijakan Hilirisasi Nikel Terhadap Peningkatan Pendapatan Negara Bukan Pajak (Minerba). *Journal of Law, Administration, and Social Science*. 4(5):798–808.doi:10.54957/jolas.v4i5.890. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://jurnalku.org/index.php/jolas/article/view/890>
- Astuti W, Mubarak Z, Chaerun S. 2011. *PROSPEK FUNGAL BIOLEACHING UNTUK PENGOLAHAN BIJIH NIKEL LATERIT DI INDONESIA*.
- Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Herlina U. 2021. TINJAUAN TEKNOLOGI PROSES EKSTRAKSI BIJIH NIKEL LATERIT. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 17(3):135–152.doi:10.30556/jtmb.Vol17.No3.2021.1156. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://jurnal.tekmira.esdm.go.id/index.php/minerba/article/view/1156>
- Dhakal C, Dahal S, Lamichhane P, Chaudhary R, Adhikari R. 2024. Synthesis and applications of nickel-based nanomaterials. hlm. 139–172.
- Dyah E. 2024 Agustus. Pelaku Tambang Bahas Inovasi-Tantangan Green Smelter, Simak di Sini! *detiknews*. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://news.detik.com/berita/d-7471633/pelaku-tambang-bahas-inovasi-tantangan-green-smelter-simak-di-sini>
- Fadlillah S, Wahyuni KT. 2023. Kajian Kebijakan Larangan Ekspor Bijih Nikel Indonesia. *semnasoffstat*. 2023(1):611–622.doi:10.34123/semnasoffstat.v2023i1.1740. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://prosiding.stis.ac.id/index.php/semnasoffstat/article/view/1740>
- Fatimah DY, Krissanto JYH, Pamunga MNA, Nugroho RP. 2023. Nickel as A Strategic Mineral and Its Potential Resources in X-Field, North Konawe, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Journal of Applied Geology*. 8(2):85–90.doi:10.22146/jag.78116. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://jurnal.ugm.ac.id/jag/article/view/78116>

- Gultom T, Sianipar A. 2020. High pressure acid leaching: a newly introduced technology in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 413:012015.doi:10.1088/1755-1315/413/1/012015.
- Hamid A, Wardiatno Y, Lumban Batu DT, Riani E. 2015 Mar. Formulir Hasil Validasi (Changes in Proximate and Fatty Acids of the eggs during Embryo Development in the Blue Swimming Crab, *Portunus pelagicus* (Linnaeus 1758) at lasongko Bay Southeast Sulawesi, Indonesia). [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/81248>
- Hanafi M. 2024. Designing nickel smelter industry investment competitiveness policy in Indonesia through system dynamics model. *Journal of Science and Technology Policy Management*. ahead-of-print(ahead-of-print).doi:10.1108/JSTPM-01-2024-0016. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jstpm-01-2024-0016/full/html>
- Handayani S. 2020. Penggunaan mikroorganisme dalam industri pemrosesan mineral. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 16:57–68.doi:10.30556/jtmb.Vol16.No2.2020.1088.
- Handayani S, Suratman S. 2017. Bioleaching of low grade nickel ore using indigenous fungi. *Indonesian Mining Journal*. 19:143–152.doi:10.30556/imj.Vol19.No3.2016.540.
- Hardiyanto MA, Setiawan KW, Sasongko NA, Almubaroq HZ. 2023. Penerapan Good Mining Practice (Gmp) Guna Mendukung Net Zero Emission 2060 (Studi Kasus: PT Vale Indonesia). *Jurnal Kewarganegaraan*. 7(2):2555–2570.doi:10.31316/jk.v7i2.5870. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://journal.upy.ac.id/index.php/pkn/article/view/5870>
- Indonesia P. 2020. UU No. 3 Tahun 2020. [diunduh 2024 Mei 14]. Tersedia pada: <http://peraturan.bpk.go.id/Details/138909/uu-no-3-tahun-2020>
- Jalaludin P, Rahman A, Andirasdini IG. 2023. Implementasi Metode Fuzzy Black-Scholes Real Options Valuation pada Rencana Investasi Smelter Nikel. *KUBIK: Jurnal Publikasi Ilmiah Matematika*. 8(2):110–118.doi:10.15575/kubik.v8i2.29738. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <https://journal.uinsgd.ac.id/index.php/kubik/article/view/29738>
- Kementerian ESDM. 2020. Peluang Investasi Nikel Indonesia.
- Kurniady SA. 2022. Web Maps Sebaran Mineral Batuan dan Klasifikasi Gambar Mineral Batuan Menggunakan Deep Learning. Universitas Gadjah Mada. [diunduh 2024 Mei 14]. Tersedia pada: <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/207433>
- Kurniawan R. 2018. Aplikasi Bioleaching Dalam Pemisahan Logam Nikel Oksida dengan Jamur *Aspergillus niger* dan *Penicillium chrysogenum*. *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan."*(0):2. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/kejuangan/article/view/2246>
- Li H, Zhang Z, Shi C, Zhou H, Feng J, Tong D, Meng F. 2024. Novel green chemical mechanical polishing by controlling pH values and redox reaction for achieving atomic surface of a nickel alloy. *Applied Surface Science*. 657:159787.doi:10.1016/j.apsusc.2024.159787. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433224005002>
- Lo MGY, Morgans CL, Santika T, Mumbunan S, Winarni N, Supriatna J, Voigt M, Davies ZG, Struebig MJ. 2024. Nickel mining reduced forest cover in Indonesia but had mixed outcomes for well-being. *One Earth*. 7(11):2019–2033.doi:10.1016/j.oneear.2024.10.010. [diunduh 2025 Jan 15]. Tersedia pada: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332224005347>
- Maharani RAS, Muin Z. 2023. Teknologi Hijau Pengelolaan Bijih Nikel Laterit (Nickel Laterite Spent Ore Treatment "Green Technology"). *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (JUTIN)*. 6(3):661–678.doi:10.31004/jutin.v6i3.16461. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <http://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jutin/article/view/16461>

- Manurung H, Amanda A. Sumber Daya Geologi Indonesia – Pusat Kajian Sumberdaya Bumi Non-Konvensional. [diunduh 2024 Mei 14]. Tersedia pada: <https://ugrg.ft.ugm.ac.id/artikel/sumberdaya-geologi-indonesia/>
- Mubarok Z, Pratama B, Chaerun S. 2015. Bioleaching nikel dari bijih limonit Pulau Gag menggunakan bakteri mixotrof. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 12:69–79.doi:10.30556/jtmb.Vol12.No1.2016.232.
- Nabilah B, Nelfia LO, Astutiningsih S. 2019. AN INNOVATION OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE BY REPLACING CEMENT WITH NICKEL SLAG POWDER. *International Journal on Livable Space*. 4:77.doi:10.25105/livas.v4i2.5602.
- Naryono E. 2023. Nickel Mine Exploitation In Indonesia, Between A Blessing And A Disaster Of Environmental Damage. .doi:10.31219/osf.io/y58qe. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://osf.io/y58qe>
- Prasetio BE, Hasrianti H. 2024. Implementasi Smart Mining dan Teknologi Hijau dalam Mitigasi Dampak Pertambangan Nikel Terhadap Lingkungan di PT. Sulawesi Cahaya Mineral. *Reslaj: Religion Education Social Laa Roiba Journal*. 6(9):4240–4248.doi:10.47467/reslaj.v6i9.2739. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <https://journal-laaroiba.com/ojs/index.php/reslaj/article/view/2739>
- Rynaldi A, Sinaga EH, Sitorus JR. 2024. Kajian Kriminologi Hijau Terhadap Studi Kasus Hilirisasi Tambang Nikel. *Jurnal Lingkungan Kebumihan Indonesia*. 1(3).doi:10.47134/kebumihan.v1i3.2572. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://journal.pubmedia.id/index.php/jilk/article/view/2572>
- Setiawan A, Horman JR. 2019. REGULATION DEVELOPMENT OF INCREASING NICKEL ADDED VALUE IN INDONESIA: PERKEMBANGAN REGULASI PENINGKATAN NILAI TAMBAH NIKEL DI INDONESIA. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*. 2(2):106–117.doi:10.56139/intan.v2i2.31. [diunduh 2024 Des 3]. Tersedia pada: <https://jurnal-intan.ac.id/index.php/intan/article/view/31>
- Setiawan I. 2016. PENGOLAHAN NIKEL LATERIT SECARA PIROMETALURGI: KINI DAN PENELITIAN KEDEPAN. *Prosiding Semnastek*.(0). [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/837>
- Sholeha U, Riani LP. 2024. Analisis Larangan Ekspor Biji Nikel Indonesia Terhadap Kondisi Ekonomi Nasional. *Prosiding Pendidikan Ekonomi*.(0):158–169. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://prosiding.unipma.ac.id/index.php/PROSPEK/article/view/5908>
- sucofindo. 2024 Mei 27. Verifikasi Smelter: Definisi dan Perkembangan Smelter Nikel di Indonesia. *Sucofindo*. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://www.sucofindo.co.id/artikel-1/verifikasi-smelter-definisi-dan-perkembangan-smelter-nikel-di-indonesia/>
- Syarifuddin N. 2022. Pengaruh Industri Pertambangan Nikel Terhadap Kondisi Lingkungan Maritim di Kabupaten Morowali | Jurnal Riset & Teknologi Terapan Kemaritiman. *Jurnal Riset dan Teknologi Terapan Kemaritiman*. 1(2):19–23. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://journal.unhas.ac.id/index.php/jrt2k/article/view/24035>
- Tangkudung AG, Kaseger JY. 2024. Hilirisasi Nikel sebagai Nilai Tambah dalam Penguatan Perekonomian Indonesia. *Jurnal Syntax Admiration*. 5(10):3946–3955.doi:10.46799/jsa.v5i10.1591. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <https://journalsyntaxadmiration.com/index.php/jurnal/article/view/1591>
- Taufik Y, Adijaya S, Rela IZ. 2022. Nickel Smelter on Social-Economics and Environmental Issues. .doi:10.21203/rs.3.rs-2232605/v1. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://www.researchsquare.com/article/rs-2232605/v1>
- USGS. 2024. Mineral Commodity Summaries 2024 | Nickel Statistics and Information.

- Wau FT, Kiton MA, Wau M, Fau JF. 2024. ANALISIS STRATEGIS KEBIJAKAN HILIRISASI MINERAL: Implikasi Ekonomi dan Pengaruhnya terhadap Perekonomian Indonesia. *Journal Publicuho*. 7(3):1215–1224.doi:10.35817/publicuho.v7i3.481. [diunduh 2024 Des 2]. Tersedia pada: <https://journalpublicuho.uho.ac.id/index.php/journal/article/view/481>
- Widiyanti J, Saputra PMA. 2023. ANALISIS DAYA SAING DAN DETERMINAN PRODUK OLAHAN NIKEL INDONESIA. *Journal of Development Economic and Social Studies*. 2(3):608–619.doi:10.21776/jdess.2023.02.3.12. [diunduh 2024 Des 4]. Tersedia pada: <https://jdess.ub.ac.id/index.php/jdess/article/view/171>