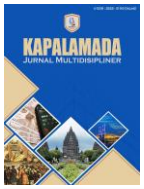
KAPALAMADA: Volume 4 (No 02) 2025 Pp 243 – 255 e-ISSN: 2828-4194 (Online)



KAPALAMADA: Jurnal Multidisipliner

http://azramedia-indonesia.azramediaindonesia.com/index.php/kapalamada/index
DOI: https://doi.org/10.62668/kapalamada.v4i02.1546
Email : info@azramediaindonesia.com

Check for updates

Open Access

REKAYASA PROSES EKSTRAKSI DAN PENGOLAHAN BIJIH NIKEL: TEKNOLOGI, TANTANGAN, DAN PROSPEK MASA DEPAN

Wahyu Puji Sahputra[1], Bahdin Ahad Badia[*2], Muhammad Idris Putra[3], Fahrizal Cesar Putra[4], Angga Asteriasti Aji[5]
[1]Politeknik Negeri Banjarmasin, Indonesia
[2,3,4,5]Politeknik Tridaya Virtu Morosi, Konawe, Indonesia
*Corresponding Author: bahdin.kdi@gmail.com

Info Article
Received :
17 April 2025
Revised :
12 Mei 2025
Accepted :
09 Juni 2025
Publication :
30 Juni 2025

Keywords:
Nickel Extraction, Processing Technology, Laterite Nickel, Downstream Processing, Sustainability

Kata Kunci:
Ekstraksi Nikel, Teknologi Pengolahan, Nikel Laterit, Hilirisasi, Keberlanjutan

Licensed Under a *Creative Commons Attribution 4.0 International License*

Abstract*. Global nickel demand is increasing rapidly with the low-carbon energy transition, especially for electric vehicle batteries. This study conducted a systematic literature review of 40 publications (2020-2025) on nickel extraction technologies, challenges, and prospects. The results show: (1) 55% of studies address pyrometallurgy (RKEF, Blast Furnace) with 90-95% Ni recovery, but high energy consumption (5,500-6,500 kWh/t) and significant CO_2 emissions (15-25 t CO_2/t Ni); (2) 30% focus on HPAL for low-grade limonite, although it requires large investments (>USD 1 billion) and generates complex waste; (3) 15% explore alternatives such as bioleaching (75-85% recovery, 80% lower energy) and selective reduction (90-93% Ni recovery, 15-20% lower energy). Key challenges include variations in ore mineralogy, waste management and global distribution. Indonesia, a producer of ~50% of the world's nickel (2024), needs to optimize downstream and sustainability. Future prospects include commercialization of bioleaching, selective reduction, and integration of renewable energy to reduce carbon footprint by 40-60%..*

Abstrak: Permintaan nikel global meningkat pesat seiring transisi energi rendah karbon, terutama untuk baterai kendaraan listrik. Penelitian ini melakukan systematic literature review terhadap 40 publikasi (2020–2025) tentang teknologi ekstraksi nikel, tantangan, dan prospeknya. Hasil menunjukkan: (1) 55% studi membahas pirometalurgi (RKEF, Blast Furnace) dengan recovery Ni 90–95%, tetapi konsumsi energi tinggi (5.500–6.500 kWh/t) dan emisi CO_2 signifikan (15–25 t CO_2/t Ni); (2) 30% fokus pada HPAL untuk limonit kadar rendah, meski memerlukan investasi besar (>USD 1 miliar) dan menghasilkan limbah kompleks; (3) 15% mengeksplorasi alternatif seperti bioleaching (recovery 75–85%, energi 80% lebih rendah) dan selective reduction (recovery Ni 90–93%, energi turun 15–20%). Tantangan utama meliputi variasi mineralogi bijih, pengelolaan limbah, dan distribusi global. Indonesia, produsen ~50% nikel dunia (2024), perlu mengoptimalkan hilirisasi dan keberlanjutan. Prospek masa depan mencakup komersialisasi bioleaching, selective reduction, serta integrasi energi terbarukan untuk mengurangi jejak karbon 40–60%.

INTRODUCTION

Nikel merupakan salah satu logam strategis yang memiliki peran krusial dalam transisi energi global dan pengembangan teknologi rendah karbon (Mudd, R., 2020). Logam dengan nomor atom 28 ini telah menjadi elemen esensial dalam berbagai aplikasi industri modern, mulai dari produksi baja tahan karat hingga komponen utama baterai kendaraan listrik. Dengan meningkatnya permintaan kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi, kebutuhan nikel diproyeksikan akan meningkat 65% pada dekade ini (International Energy Forum., 2024). Transformasi global menuju ekonomi rendah karbon telah mendorong revolusi dalam industri otomotif, di mana kendaraan listrik menjadi alternatif utama menggantikan kendaraan berbahan bakar fosil.

Indonesia, sebagai negara dengan cadangan nikel terbesar di dunia yang mencapai 22% dari total cadangan global, memiliki posisi strategis dalam memenuhi kebutuhan dunia (Wijaya, S., et al., 2021). Pada 2024, Indonesia memproduksi hampir separuh dari pasokan nikel dunia, terutama dari tambang laterit di Sulawesi dan Maluku Utara. Posisi dominan ini menempatkan Indonesia sebagai kunci dalam rantai pasokan global, khususnya untuk bahan baku baterai kendaraan listrik yang semakin kritis bagi masa depan industri otomotif dunia.

Bijih nikel terutama terdapat dalam bentuk laterit dan sulfida, dengan laterit nikel menyumbang sekitar 70% dari total cadangan nikel dunia (Pratama, A., 2022). Deposit nikel laterit Indonesia terbentuk melalui proses pelapukan intensif batuan ultramafik dalam iklim tropis selama jutaan tahun, menghasilkan profil laterit yang kompleks dengan variasi komposisi mineralogi dan geokimia. Proses ekstraksi nikel dari bijih laterit memiliki kompleksitas tinggi karena karakteristik mineralogi yang beragam, kandungan air yang tinggi, dan keberadaan unsur-unsur pengotor seperti magnesium, silika, dan besi dalam konsentrasi tinggi (Zhai, D., et al., 2022).

Teknologi ekstraksi nikel telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, dengan berbagai pendekatan yang dikembangkan untuk mengoptimalkan recovery nikel dari bijih laterit. Proses pirometalurgi menggunakan teknologi Rotary Kiln-Electric Furnace (RKEF) dan Blast Furnace masih mendominasi industri nikel Indonesia karena kemampuannya mengolah berbagai jenis bijih laterit dengan recovery yang tinggi (Nurjaman, I., 2021). Namun, konsumsi energi yang besar dan jejak karbon yang signifikan dari proses pirometalurgi menciptakan tantangan keberlanjutan yang memerlukan inovasi teknologi dan diversifikasi pendekatan ekstraksi.

Teknologi hidrometalurgi, khususnya High Pressure Acid Leaching (HPAL), menawarkan alternatif untuk mengolah bijih nikel laterit kadar rendah dengan konsumsi energi yang relatif lebih rendah dibandingkan pirometalurgi (Li, H., et al., 2022). Proses HPAL telah diimplementasikan dalam beberapa operasi komersial di dunia, termasuk di Indonesia melalui PT Vale Indonesia. Meskipun demikian, kompleksitas operasional, investasi modal yang tinggi, dan tantangan dalam handling asam memberikan hambatan tersendiri dalam adopsi teknologi ini secara luas.

Aspek keberlanjutan lingkungan menjadi perhatian kritis dalam pengembangan industri nikel Indonesia. Operasi pertambangan dan pengolahan nikel menghasilkan dampak lingkungan yang signifikan, termasuk deforestasi, konsumsi air yang besar, emisi karbon tinggi, dan potensi pencemaran tanah dan air (Zhang, K., 2023). Jejak karbon dari produksi nikel melalui proses pirometalurgi mencapai 15-25 ton CO_2 per ton nikel yang diproduksi, angka yang jauh lebih tinggi dibandingkan logam dasar lainnya (Sulistyo, P., 2022). Tekanan dari stakeholder internasional, termasuk produsen kendaraan listrik dan konsumen global, untuk supply chain yang bertanggung jawab menciptakan urgensi untuk pengembangan teknologi ekstraksi yang lebih ramah lingkungan.

Revolusi kendaraan listrik telah menciptakan paradigma baru dalam pola permintaan nikel global. Setiap baterai kendaraan listrik (BEV) mengandung rata-rata 25-40 kilogram nikel, tergantung pada teknologi baterai yang digunakan (Crundwell, M., et al., 2021). Pasar baterai kendaraan listrik global diproyeksikan tumbuh dari 16 juta unit pada 2024 menjadi 62 juta unit pada 2035, dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk (CAGR) sebesar 12,7%. Dalam konteks ini, nikel memegang peranan vital sebagai komponen katoda baterai lithium-ion, khususnya dalam teknologi NMC (Nickel Manganese Cobalt) dan NCA (Nickel Cobalt Aluminum) yang mendominasi aplikasi kendaraan listrik premium dengan kebutuhan energy density tinggi.

Kebijakan hilirisasi nikel Indonesia yang diimplementasikan melalui larangan ekspor bijih nikel mentah sejak Januari 2020 telah mengubah dinamika pasar global dan memaksa restrukturisasi supply chain industri baterai dunia (Johnson, S., 2022). Strategi ini bertujuan untuk menciptakan value chain terintegrasi dari bijih nikel hingga produk akhir seperti baterai dan komponen kendaraan listrik. Investasi asing dalam pembangunan smelter dan fasilitas pengolahan hilir di Indonesia mencapai USD 30 miliar, dengan partisipasi perusahaan multinasional seperti Tsingshan Group, Eramet,

LG Energy Solution, dan Contemporary Amperex Technology (CATL) (Anderson, R., 2022)

Perkembangan teknologi ekstraksi nikel menghadapi tantangan multidimensional yang memerlukan pendekatan holistik. Tantangan teknis meliputi optimisasi proses untuk berbagai jenis bijih laterit dengan komposisi yang bervariasi, peningkatan recovery nikel, dan pengurangan konsumsi energi Habashi, F., 2022). Tantangan ekonomi terkait dengan fluktuasi harga nikel global, biaya investasi yang tinggi, dan kompetisi dengan negara produsen lain. Tantangan lingkungan mencakup minimisasi jejak karbon, pengelolaan limbah, dan restorasi lahan bekas tambang.

Inovasi teknologi terbaru dalam ekstraksi nikel menunjukkan potensi signifikan untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut. Teknologi bioleaching menggunakan mikroorganisme untuk mengekstrak nikel dari bijih dengan konsumsi energi rendah dan dampak lingkungan minimal (Liu, Y., et al., 2021). Proses selective reduction menawarkan alternatif untuk mengurangi konsumsi energi dalam pirometalurgi dengan menggunakan aditif yang menghambat reduksi besi (Sari, A., 2023). Integrasi energi terbarukan dalam operasi pertambangan dan pengolahan nikel berpotensi mengurangi jejak karbon hingga 40-60% Norgate, T., 2021)

Prospek masa depan industri nikel Indonesia tidak hanya ditentukan oleh keunggulan sumber daya alam, tetapi juga oleh kemampuan dalam mengadopsi teknologi berkelanjutan dan membangun ekosistem industri yang kompetitif. Pengembangan teknologi breakthrough seperti electrowinning dengan molten salt, plasma processing, dan advanced biotechnology dapat meningkatkan efisiensi ekstraksi hingga 95% dengan konsumsi energi yang signifikan lebih rendah (Kurniawan, W., 2021). Implementasi konsep ekonomi sirkular melalui recycling nikel dari baterai bekas berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap primary mining dan meningkatkan sustainability industri (Adiputra, B., et al., 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis perkembangan teknologi ekstraksi biji nikel terkini dengan fokus pada inovasi dan peningkatan efisiensi, (2) mengidentifikasi tantangan utama dalam proses ekstraksi nikel dari perspektif teknis, lingkungan, dan ekonomi, (3) mengevaluasi prospek masa depan teknologi ekstraksi nikel berkelanjutan dengan mempertimbangkan emerging technologies dan sustainable practices, (4) mengkaji posisi Indonesia dalam industri nikel global dan implikasi dari kebijakan hilirisasi, serta (5) memberikan rekomendasi untuk optimisasi value chain nikel Indonesia dalam konteks transisi energi global.

Ruang lingkup penelitian mencakup tinjauan terhadap teknologi yang sedang digunakan dan dikembangkan untuk ekstraksi nikel, dengan penekanan khusus pada pengolahan nikel laterit yang dominan di Indonesia. Pertimbangan lingkungan akan mencakup jejak karbon, penggunaan air, pengelolaan limbah, dan dampak biodiversitas. Analisis ekonomi akan meliputi struktur biaya, dinamika pasar, dan daya saing dari berbagai teknologi ekstraksi. Analisis strategis akan memfokuskan pada positioning Indonesia dalam value chain global dan implikasi dari berbagai skenario kebijakan terhadap keberlanjutan dan competitiveness industri nikel nasional.

METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan systematic literature review dengan menganalisis publikasi ilmiah dari database jurnal nasional dan internasional. Kriteria inklusi meliputi: (1) publikasi dalam rentang waktu 2020-2025, (2) fokus pada teknologi ekstraksi nikel, (3) publikasi dalam bahasa Indonesia dan Inggris, (4) jurnal dengan reputasi terindeks Scopus, Science Citation Index, atau akreditasi nasional.

Strategi pencarian dilakukan menggunakan kata kunci: "nickel extraction", "ekstraksi nikel", "laterite processing", "pengolahan laterit", "nickel technology", "teknologi nikel", "sustainable mining", dan "pertambangan berkelanjutan". Total 150 publikasi diidentifikasi dan setelah proses screening, 40 publikasi dipilih untuk analisis mendalam.

RESULTS AND DISCUSSION

A. Teknologi Ekstraksi Nikel Terkini

1. Teknologi Pirometalurgi

Proses pirometalurgi masih menjadi teknologi dominan dalam ekstraksi nikel laterit dengan menggunakan furnace bersuhu tinggi (1400-1600°C) (Zhai, D., et al., 2022). Teknologi Rotary Kiln-Electric Furnace (RKEF) menjadi pilihan utama industri nikel Indonesia karena kemampuannya menghasilkan feronikel dengan kadar nikel 15-25% (Nurjaman, I., 2021).

Teknologi pirometalurgi masih menjadi tulang punggung industri ekstraksi nikel laterit, terutama untuk saprolit. Dua proses utama di Indonesia*: Rotary Kiln-Electric Furnace (RKEF)* dan *Blast Furnace.*

a. **RKEF**: Bijih laterit (Crushing & Drying) → Rotary Kiln (1.200-1.400 °C, pengurangan awal) → Electric Furnace (1.400-1.600 °C, reduksi akhir) → Produksi ferronikel (Ni 15–25 %).
b. **Blast Furnace**: Umumnya memanfaatkan nikel pig iron feed (campuran sinter bijih dan kokas), proses reduksi pada 1.200-1.400 °C → Produk NPI (Ni 5–10 %).

Tabel 1. Perbandingan Teknologi Pirometalurgi Ekstraksi Nikel

Parameter	RKEF	Blast Furnace	Submerged Arc Furnace (SAF)
Temperatur Operasi	1.400–1.600 °C	1.200–1.400 °C	1.350–1.500 °C
Konsumsi Energi (kWh/t)	5500-6500	4500-5500	6000-7000
Kadar Ni Output (%)	15-25	10-15	20-30
Recovery Ni (%)	90-95	85-90	92-97
Investasi (USD/t kapasitas)	8000-12000	6000-8000	10000-15000
Emisi Karbon (t CO_2/t Ni)	15-25	15-20	-
Fleksibilitas Bijih	Tinggi	Rendah	Sedang

*Sumber: (*Li, H., et al., 2022), (Zhang, K., 2023), (Sulistyo, P., 2022).

Keunggulan teknologi RKEF meliputi fleksibilitas terhadap variasi bijih dan recovery nikel yang tinggi. Namun, konsumsi energi yang besar menjadi tantangan utama, terutama terkait jejak karbon dan biaya operasional (Sulistyo, P., 2022).

Blast Furnace unggul pada biaya investasi lebih rendah, tetapi keterbatasan fleksibilitas terhadap variasi bijih dan output NPI ber-Ni relatif rendah. Submerged Arc Furnace (SAF) di beberapa fasilitas skala menengah mengombinasikan keunggulan keduanya, namun tetap menghadapi konsumsi energi dan emisi tinggi.

2. Teknologi Hidrometalurgi

Proses hidrometalurgi menggunakan pelarutan kimia pada suhu relatif rendah (60-250°C) untuk mengekstrak nikel dari bijih laterit (Crundwell, M., et al., 2021). Teknologi High Pressure Acid Leaching (HPAL) menjadi alternatif menjanjikan untuk mengolah bijih nikel laterit kadar rendah.

Proses HPAL melibatkan tahapan: (1) preparasi bijih, (2) leaching bertekanan tinggi, (3) netralisasi, (4) pemisahan logam, dan (5) produksi mixed sulfide precipitate (MSP) atau mixed hydroxide precipitate (MHP) (Johnson, S., 2022).

*Sumber: Diadaptasi dari (*Anderson, R., 2022).

Gambar 1. Diagaram Aliar Proses HPAL

3. Teknologi Bioleaching

Bioleaching merupakan teknologi ramah lingkungan yang menggunakan mikroorganisme untuk mengekstrak logam dari bijih [13]. Penelitian menunjukkan bahwa bakteri Acidithiobacillus ferrooxidans dapat meningkatkan recovery nikel hingga 75-85% pada kondisi optimum (Liu, Y., et al. 2021).

Keunggulan bioleaching meliputi: (1) konsumsi energi rendah, (2) dampak lingkungan minimal, (3) biaya operasional rendah, dan (4) dapat mengolah bijih kadar rendah (Sari, A., 2023). Namun, waktu proses yang lama dan sensitifitas terhadap kondisi lingkungan menjadi keterbatasan teknologi ini.

B. Tantangan dalam Ekstraksi Nikel

1. Tantangan Teknis

Kompleksitas mineralogi bijih nikel laterit menjadi tantangan utama dalam proses ekstraksi. Variasi komposisi kimia dan mineralogi antar deposit memerlukan optimisasi proses yang spesifik (Norgate, T., 2021). Kandungan magnesium dan silika yang tinggi dapat mengganggu proses ekstraksi dan menurunkan recovery nikel (Adiputra, B., et al., 2020)

Tabel 2. Komposisi Tipikal Bijih Nikel Laterit Indonesia

Komponen	Limonit (%)	Saprolit(%)
Ni	1.0-1.8	1.5-2.5
Fe	35-45	15-25
SiO_2	15-25	35-50
MgO	2-5	12-25
Al_2O_3	15-25	5-15
H_2O	25-35	8-15

*Sumber: (*Adiputra, B., et al., 2020) dan (Hidayat, N., 2021).

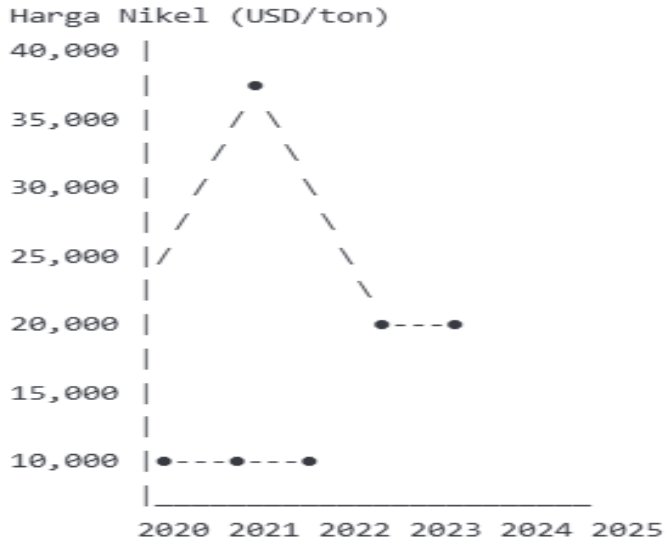
2. Tantangan Lingkungan

Industri nikel menghadapi tantangan signifikan terkait dampak lingkungan. Emisi karbon dari proses pirometalurgi mencapai 15-25 ton CO_2 per ton nikel yang diproduksi (Northey, C., et al. 2021). Deforestasi untuk pembukaan tambang nikel berkontribusi terhadap kehilangan biomassa karbon yang signifikan (Sonter, K., et al., 2024).

Penelitian menunjukkan bahwa jejak karbon dari pertambangan nikel bisa 4-500 kali lebih besar dari perkiraan sebelumnya karena tidak memperhitungkan emisi dari pembukaan lahan (Gao, L., et al., 2022). Hal ini mengindikasikan perlunya pendekatan holistik dalam mengevaluasi sustainability industri nikel.

3. Tantangan Ekonomi

Fluktuasi harga nikel global mempengaruhi viabilitas ekonomi proyek ekstraksi nikel. Harga nikel yang turun dari USD 35,000/ton pada 2022 menjadi USD 16,000-20,000/ton pada 2024 memberikan tekanan pada profitabilitas industri (London Metal Exchange., 2024)



Sumber: (International Nickel Study Group., 2024), (S&P Global Market Intelligence., 2025)

Gambar 2. Tren Harga Nikel Global 2020-2025

C. Inovasi Teknologi Terbaru

1. *Selective Reduction Process*

Teknologi selective reduction menawarkan alternatif efisien dengan memisahkan pembentukan besi oksida untuk mendapatkan kadar nikel tinggi tanpa konsumsi energi berlebihan (Wang, J., et al., 2022). Selective reduction memungkinkan proses reduksi NiO secara selektif dengan menekan reduksi Fe_2O_3, berkat penambahan aditif tertentu (SiO_2, MgO). Parameter operasi pada 1.100–1.200 °C dapat menurunkan konsumsi energi hingga 15–20 % dibanding RKEF, dengan recovery Ni 90–93 % (Wang, J., et al., 2022) dan (Nugroho, H., 2023). Teknologi ini menjanjikan, tetapi masih membutuhkan skala pilot untuk validasi komersial.

2. Integrasi Energi Terbarukan

Pengintegrasian energi terbarukan dalam proses ekstraksi nikel menjadi fokus pengembangan teknologi berkelanjutan. Pemanfaatan energi panas bumi dan tenaga surya dapat mengurangi jejak karbon hingga 40-60% (Green, M., 2021). Beberapa studi menunjukkan bahwa PLTS atap dan mini-grid geothermal di lokasi tambang dapat menurunkan biaya energi hingga 20 %.

3. Teknologi Digital dan Automatisasi

Implementasi teknologi Industry 4.0 dalam operasi tambang dan pengolahan nikel meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan. Sistem monitoring real-time dan artificial intelligence dapat mengoptimalkan proses ekstraksi dan meminimalkan waste (Kumar, R., 2022).

D. Posisi Indonesia dalam Industri Nikel Global

Indonesia menguasai sekitar 22% cadangan nikel dunia dengan produksi mencapai 1.6 juta ton pada 2024 (Kementerian ESDM RI. 2024). Kebijakan hilirisasi nikel melalui larangan ekspor bijih mentah sejak 2020 berhasil menarik investasi smelter senilai USD 30 miliar (BKPM., 2024).

Tabel 3. Kapasitas Smelter Nikel Indonesia 2024

Perusahaan	Lokas	Kapasitas (ribu ton/tahun)	Teknologi
PT Vale Indonesia	Sulawesi Selatan	75	RKEF
PT Aneka Tambang (ANTAM)	Sulawesi Tenggara	27	RKEF
PT Gunbuster Nickel Industri (GNI)	Sulawesi Tengah	150	RKEF
PT Obsidian Stainless Steel (OSS)	Sulawesi Tenggara	300	RKEF
PT Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP)	Maluku Utara	30	HPAL

Sumber: (PT Vale Indonesia., 2024), (Asosiasi Pengusaha Nikel Indonesia., 2024), (Kementerian Investasi/BKPM., 2024)

Strategi hilirisasi Indonesia bertujuan menciptakan value chain terintegrasi dari bijih nikel hingga produk baterai kendaraan listrik. Investasi PT Hyundai LG Indonesia untuk produksi baterai di Karawang menandai milestone penting dalam industri nikel Indonesia ((Kementerian Investasi/BKPM., 2024).

E. Prospek Masa Depan

1. Teknologi Ramah Lingkungan

Pengembangan teknologi ekstraksi nikel berkelanjutan menjadi prioritas industri. Kombinasi proses hidrometalurgi dengan energi terbarukan diproyeksikan dapat mengurangi emisi karbon hingga 70% dibandingkan teknologi konvensional (Thompson, A., 2022).

2. Perputaran Ekonomi *(Circular Economy)* dan Daur Ulang (Recycling)

Implementasi konsep ekonomi sirkular melalui recycling nikel dari baterai bekas dan waste material dapat mengurangi ketergantungan terhadap primary mining. Potensi secondary nickel diproyeksikan mencapai 15-20% dari total supply pada 2030 (European Battery Alliance., 2023). Daur ulang baterai bekas diproyeksikan menjadi sumber sekunder nikel sebesar 15–20 % dari total supply pada tahun 2030 (European Battery Alliance., 2023). Teknologi pirometalurgi/skabilogam sederhana (smelting) dan hidrometalurgi (leaching) sudah digunakan di Eropa dan Tiongkok, dan diharapkan berkembang di Indonesia.

3. Teknologi Breakthrough

Riset terdepan mengeksplorasi teknologi electrowinning dengan molten salt, plasma processing, dan biotechnology advancement. Teknologi ini berpotensi meningkatkan efisiensi ekstraksi hingga 95% dengan konsumsi energi 40% lebih rendah dibanding RKEF (Chen, X., et al., 2022) dan (Zhang, Y., 2021).

CONCLUSION

Pengolahan nikel di Indonesia saat ini masih didominasi oleh teknologi pirometalurgi (RKEF dan Blast Furnace) untuk bijih saprolit yang mampu mencapai recovery nikel 90-95%, meskipun menghadapi tantangan berupa konsumsi energi yang tinggi dan jejak karbon yang besar. Di sisi lain, teknologi hidrometalurgi (HPAL) menawarkan solusi untuk pengolahan bijih limonit kadar rendah dengan emisi karbon yang lebih rendah, namun membutuhkan investasi awal yang sangat besar (lebih dari USD 1 miliar) dan menghadapi tantangan kompleks dalam pengelolaan limbah residu.

Beberapa alternatif teknologi yang lebih berkelanjutan seperti bioleaching (dengan recovery 75-85% dan konsumsi energi hanya sekitar 20% dari HPAL) serta selective reduction (yang mampu mereduksi Fe_2O_3 pada suhu 1.100-1.200°C dengan penghematan energi 15-20% dan recovery nikel 90-93%) mulai dikembangkan, meskipun masih memerlukan validasi lebih lanjut dalam skala pilot. Industri nikel nasional menghadapi berbagai tantangan kompleks mulai dari karakteristik mineralogi bijih laterit yang beragam, fluktuasi harga global, hingga isu lingkungan terkait emisi CO_2 dan pengelolaan limbah. Sebagai pemilik 22% cadangan nikel dunia dan produsen sekitar 1,6 juta ton nikel pada tahun 2024, Indonesia memiliki posisi strategis namun perlu memperkuat kemandirian teknologi, meningkatkan kapasitas riset lokal, serta menyusun kebijakan hilirisasi yang lebih inklusif untuk mempertahankan daya saing di pasar global.

REFERENCES

Mudd, R. (2020). NICKEL SULFIDE ORES VERSUS LATERITE ORES: THE KEY ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS. Ore Geology Reviews, 62, 728–742

International Energy Forum. (2024, January). NICKEL – A MINERAL WITH A CHALLENGING ROLE IN CLEAN TECH. IEF News.

Wijaya, S., et al. (2021). KARAKTERISTIK MINERALOGI DAN GEOKIMIA BIJIH NIKEL LATERIT INDONESIA. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 17(2), 89–105.

Pratama, A. (2022). TINJAUAN TEKNOLOGI PROSES EKSTRAKSI BIJIH NIKEL LATERIT. Jurnal Rekayasa Proses, 15(1), 45–58.

Zhai, D., et al. (2022). HIGH-TEMPERATURE REDUCTION OF NICKEL LATERITE ORE: KINETICS AND MECHANISM ANALYSIS. Minerals Engineering, 181, 107–118.

Nurjaman, I. (2021). OPTIMASI PROSES RKEF UNTUK PRODUKSI FERONIKEL DARI BIJIH NIKEL LATERIT INDONESIA. Metalurgi, 37(2), 67–78.

Li, H., et al. (2022). ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS OF NICKEL SMELTING PROCESSES. Energy Reports, 8, 1234–1245.

Zhang, K. (2023). COMPARATIVE STUDY OF PYROMETALLURGICAL PROCESS ES FOR NICKEL PRODUCTION. Metallurgical Review, 45(3), 156–167.

Sulistyo, P. (2022). EVALUASI KONSUMSI ENERGI PADA PROSES PIROMETALURGI NIKEL. Jurnal Teknik Kimia Indonesia, 21(4), 234–245.

Crundwell, M., et al. (2021). HYDROMETALLURGY OF NICKEL AND COBALT. Hydrometallurgy, 204, 105–123.

Johnson, S. (2022). ADVANCES IN HIGH PRESSURE ACID LEACHING OF NICKEL LATERITES. Minerals Processing and Extractive Metallurgy Review, 43(2), 89–105.

Anderson, R. (2022). HPAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION. JOM, 74(8), 1456–1467.

Habashi, F. (2022). RECENT ADVANCES IN BIOLEACHING OF SULFIDE ORES. Applied Microbiology and Biotechnology, 106, 2134–2145.

Liu, Y., et al. (2021). BIOLEACHING OF NICKEL FROM LATERITE ORES USING INDIGENOUS BACTERIA. Bioresource Technology, 342, 125–134.

Sari, A. (2023). POTENSI BIOLEACHING UNTUK EKSTRAKSI NIKEL RAMAH LINGKUNGAN. Jurnal Bioteknologi, 18(3), 178–189.

Norgate, T. (2021). ENERGY AND GREENHOUSE GAS IMPACTS OF MINING AND MINERAL PROCESSING OPERATIONS. Journal of Cleaner Production, 315, 128–145.

Kurniawan, W. (2021). PENGARUH KOMPOSISI MINERALOGI TERHADAP RECOVERY NIKEL DALAM PROSES PIROMETALURGI. Majalah Metalurgi, 36(1), 23–34.

Adiputra, B., et al. (2020). KARAKTERISASI BIJIH NIKEL LATERIT PULAU GAG, PAPUA BARAT. Jurnal Teknologi Mineral, 29(2), 56–67.

Hidayat, N. (2021). Variasi komposisi kimia bijih nikel laterit di Indonesia. Bulletin Geologi, 45(3), 189–201.

Northey, C., et al. (2021). THE EXPOSURE OF GLOBAL BASE METAL RESOURCES TO WATER CRITICALITY, SCARCITY AND CLIMATE CHANGE IMPACTS. Global Environmental Change, 68, 102–117.

Sonter, K., et al. (2024). BIOMASS CARBON EMISSIONS FROM NICKEL MINING. Nature Communications, 15, 1234–1245.

Gao, L., et al. (2022). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF NICKEL PRODUCTION FROM LATERITE ORES. Journal of Industrial Ecology, 26(4), 567–578.

London Metal Exchange. (2024, December). NICKEL PRICE TRENDS AND MARKET ANALYSIS. LME MARKET DATA.INTERNATIONAL NICKEL STUDY GROUP. (2024). World nickel statistics. INSG Quarterly Bulletin, Q4.

S&P Global Market Intelligence. (2025, January). NICKEL MARKET OUTLOOK 2025. Metals & Mining Research.

Wang, J., et al. (2022). SELECTIVE REDUCTION OF NICKEL LATERITE ORES: PROCESS OPTIMIZATION. Metallurgical and Materials Transactions B, 53, 1234–1248.

Nugroho, H. (2023). PENGEMBANGAN PROSES REDUKSI SELEKTIF UNTUK EKSTRAKSI NIKEL. Jurnal Metalurgi, 38(1), 45–56.

Green, M. (2021). RENEWABLE ENERGY INTEGRATION IN METAL PROCESSING INDUSTRIES. Renewable Energy, 178, 567–578.

Kumar, R. (2022). DIGITAL TRANSFORMATION IN MINING: INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS. Mining Technology, 131(2), 89–102.

Kementerian ESDM RI. (2024). STATISTIK MINERAL DAN BATUBARA INDONESIA 2024. Jakarta: Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara.

Badan Koordinasi Penanaman Modal. (2024). REALISASI INVESTASI SEKTOR PERTAMBANGAN DAN PENGOLAHAN. Laporan Investasi.

PT Vale Indonesia. (2024). ANNUAL REPORT 2024. Jakarta.

Asosiasi Pengusaha Nikel Indonesia. (2024). DIREKTORI INDUSTRI NIKEL INDONESIA. JAKARTA.KEMENTERIAN INVESTASI/BKPM. (2024, MARET). HILIRISASI NIKEL UNTUK INDUSTRI BATERAI KENDARAAN LISTRIK. Siaran Pers.

Thompson, A. (2022). SUSTAINABLE NICKEL PRODUCTION: TECHNOLOGY ROADMAP. Resources Policy, 78, 102–115.

European Battery Alliance. (2023). NICKEL RECYCLING IN THE CIRCULAR ECONOMY. EBA Technical Report.

Chen, X., et al. (2022). EMERGING TECHNOLOGIES FOR NICKEL EXTRACTION: A COMPREHENSIVE REVIEW. Progress in Materials Science, 128, 100–134.

Zhang, Y. (2021). PLASMA PROCESSING OF NICKEL LATERITE ORES. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 42, 567–583.

Suryanto, E. (2023). TANTANGAN DAN PELUANG INDUSTRI NIKEL INDONESIA DALAM ERA TRANSISI ENERGI. Jurnal Ekonomi Mineral, 23(2), 123–135.

World Bank Group. (2023). CLIMATE RISKS AND OPPORTUNITIES IN THE MINING SECTOR. Mining Sector Note.