



Analisis Komparatif Jalur Hidrometalurgi dan Pirometalurgi dalam Ekstraksi Bijih Nikel Laterit untuk Bahan Baku Baterai Kendaraan Listrik

Muh Syafri Zainuddin¹, Erin Savitri Gawing², Misdayanti³, Fajar Ramadhan⁴

^{1,2,3} Jurusan Teknologi Rekayasa Metalurgi, Politeknik Dewantara, Kota Palopo, Indonesia

⁴ Jurusan Elektronika, Politeknik Dewantara, Kota Palopo, Indonesia

Email : muh.syafri13@gmail.com

Article Info

Article history:

Received November 29, 2025

Revised December 08, 2025

Accepted December 21, 2025

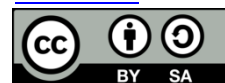
Keywords:

Laterite Nickel,
Hydrometallurgy,
Pyrometallurgy, High-Pressure
Acid Leaching, Electric Vehicle
Batteries

ABSTRACT

The rapid increase in nickel demand as a key raw material for electric vehicle (EV) batteries necessitates a critical evaluation of processing technologies for laterite nickel ores. This review article presents a comprehensive synthesis of hydrometallurgical and pyrometallurgical routes for laterite nickel extraction, with a particular focus on their suitability for battery material specifications. The analysis considers ore characteristics, metal recovery efficiency, energy consumption, and environmental impacts based on recent literature. The findings indicate that hydrometallurgical processing, particularly high-pressure acid leaching, currently represents the most compatible approach for battery material production due to its ability to deliver high-purity nickel and cobalt. In contrast, pyrometallurgical routes remain relevant for processing high-grade saprolitic ores but face significant limitations in terms of high energy demand and substantial carbon footprint when applied conventionally. This review emphasizes that an integrated approach combining pyrometallurgical pre-treatment with hydrometallurgical refining offers a rational and sustainable strategy for strengthening laterite-based nickel supply chains for electric vehicle battery applications.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received November 29, 2025

Revised December 08, 2025

Accepted December 21, 2025

Keywords:

Nikel Laterit, Hidrometalurgi,
Pirometalurgi, High-Pressure
Acid Leaching, Baterai
Kendaraan Listrik

ABSTRAK

Peningkatan pesat kebutuhan nikel sebagai bahan baku baterai kendaraan listrik mendorong perlunya evaluasi kritis terhadap teknologi pengolahan bijih nikel laterit. Artikel tinjauan ini menyajikan sintesis komprehensif jalur hidrometalurgi dan pirometalurgi dalam ekstraksi nikel laterit dengan fokus pada kesesuaian terhadap spesifikasi material baterai. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik bijih, efisiensi pemulihan logam, konsumsi energi, serta dampak lingkungan berdasarkan literatur terkini. Hasil kajian menunjukkan bahwa jalur hidrometalurgi, khususnya *high-pressure acid leaching*, saat ini merupakan pendekatan paling kompatibel untuk produksi material baterai karena kemampuannya menghasilkan nikel dan kobalt dengan tingkat kemurnian tinggi. Sebaliknya, jalur pirometalurgi tetap relevan untuk pengolahan bijih saprolit berkadar nikel tinggi, namun menghadapi keterbatasan berupa konsumsi energi yang besar dan jejak karbon yang signifikan apabila diterapkan secara konvensional. Jurnal ini menegaskan bahwa pendekatan terpadu yang mengombinasikan prapengolahan pirometalurgi dengan pemurnian



hidrometalurgi berpotensi menjadi strategi yang paling rasional dan berkelanjutan dalam mendukung rantai pasok bahan baku baterai kendaraan listrik berbasis nikel laterit.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Muh Syafri Zainuddin

Politeknik Dewantara

E-mail: muh.syafri13@gmail.com

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan nikel secara global, yang didorong secara signifikan oleh pertumbuhan industri baterai kendaraan listrik (*electric vehicle*, EV), menandai perubahan fundamental dalam strategi pemanfaatan sumber daya mineral. Selama beberapa dekade, bijih nikel sulfida menjadi sumber utama produksi nikel dunia. Namun, keterbatasan cadangan dan menurunnya ketersediaan bijih sulfida telah mendorong pergeseran eksploitasi menuju bijih nikel laterit, yang saat ini diperkirakan menyumbang sekitar 60% dari total sumber daya nikel global (Rizky dkk., 2022). Peralihan ini membawa tantangan teknis yang signifikan, mengingat bijih nikel laterit memiliki karakteristik mineralogi yang kompleks, heterogen, serta umumnya berkadar nikel lebih rendah dibandingkan bijih sulfida (Bahfie dkk., 2022).

Secara historis, pengolahan bijih nikel laterit lebih difokuskan pada produksi feronikel dan *nickel pig iron* (NPI) yang ditujukan untuk industri baja tahan karat (Jian-ming dkk., 2011; Rizky dkk., 2022). Namun demikian, perkembangan industri baterai kendaraan listrik menuntut spesifikasi bahan baku yang jauh lebih ketat, khususnya dalam hal kemurnian nikel dan kobalt, yang umumnya dipasok dalam bentuk senyawa sulfat berkadar tinggi. Kondisi ini menuntut evaluasi ulang terhadap jalur-jalur ekstraksi nikel yang telah mapan, sekaligus mendorong kajian komparatif yang komprehensif terhadap teknologi hidrometalurgi dan pirometalurgi dalam konteks produksi nikel berkualitas baterai (*battery-grade nickel*) (Rizky dkk., 2022). Oleh karena itu, artikel tinjauan ini bertujuan untuk menganalisis secara kritis kedua jalur ekstraksi tersebut dengan mempertimbangkan aspek efisiensi proses, konsumsi energi, kelayakan teknis, serta dampak lingkungan, khususnya dalam kaitannya dengan kebutuhan bahan baku baterai kendaraan listrik. Analisis ini juga mengintegrasikan karakteristik bijih, kesesuaian teknologi, serta tantangan dan peluang pengembangan di masa depan berdasarkan literatur dan kemajuan teknologi terkini.

Bijih nikel laterit secara geologis tersusun atas beberapa lapisan dengan karakteristik yang berbeda, yang secara langsung memengaruhi pemilihan metode pengolahan yang optimal (Bahfie dkk., 2022). Lapisan teratas, yaitu limonit, umumnya memiliki kandungan nikel yang relatif rendah dengan kadar besi yang tinggi. Di bawahnya terdapat lapisan saprolit yang cenderung memiliki kandungan nikel lebih tinggi, serta mineralisasi nikel seperti garnierit yang juga berkontribusi terhadap potensi sumber daya nikel (Bahfie dkk., 2022). Variasi komposisi ini menjadi faktor kunci dalam menentukan jalur ekstraksi yang paling sesuai. Metode hidrometalurgi, misalnya, sering dianggap lebih efektif untuk bijih limonit karena kemampuannya melarutkan logam secara selektif dari material berkadar rendah dan kaya besi.



Sebaliknya, jalur pirometalurgi umumnya lebih diaplikasikan pada bijih saprolit yang memiliki kadar nikel lebih tinggi, mengingat proses ini melibatkan peleburan pada temperatur tinggi (Bahfie dkk., 2022). Keterkaitan yang erat antara karakteristik bijih dan pemilihan teknologi pengolahan inilah yang menjadi dasar utama analisis komparatif dalam kajian ini.

TINJAUAN UMUM

1) Karakteristik Bijih dan Kesesuaian Teknologi

Pemilihan teknologi pengolahan yang tepat untuk bijih nikel laterit pada dasarnya ditentukan oleh karakteristik fisikokimia intrinsik bijih tersebut, khususnya komposisi mineralogi dan distribusi unsur logam di dalamnya, bukan oleh penerapan satu metode yang bersifat universal untuk seluruh tipe laterit (Fan dkk., 2024; Li dkk., 2015). Setiap endapan laterit memiliki karakteristik yang berbeda sehingga tidak semua jalur ekstraksi dapat diaplikasikan secara efektif dan ekonomis pada seluruh jenis bijih. Oleh karena itu, klasifikasi bijih nikel laterit menjadi dasar penting dalam menentukan jalur teknologi yang optimal guna meningkatkan efisiensi proses serta kelayakan ekonomi pengolahan (Peng dkk., 2011).

Secara geologis, bijih nikel laterit tersusun atas beberapa lapisan utama yang masing-masing memiliki karakteristik mineralogi dan kimia yang berbeda, sehingga memengaruhi kesesuaian teknologi pengolahan yang dapat diterapkan (Fan dkk., 2024). Lapisan-lapisan tersebut umumnya diklasifikasikan sebagai berikut.

Lapisan limonit merupakan lapisan paling atas yang umumnya dicirikan oleh kadar nikel yang relatif rendah dan kandungan besi yang tinggi. Pada beberapa endapan laterit, kadar besi dapat mencapai lebih dari 50%, sementara kadar nikel berada pada kisaran yang jauh lebih rendah. Nikel pada lapisan limonit umumnya terikat pada mineral oksihidroksida besi, seperti goetit, yang terbentuk akibat proses pelapukan intensif pada batuan ultrabasa (Hai-kuo dkk., 2011; Ribeiro dkk., 2019).

Di bawah lapisan limonit terdapat lapisan saprolit, yang umumnya memiliki kadar nikel lebih tinggi dibandingkan limonit. Pada lapisan ini, nikel terutama terasosiasi dengan mineral silikat seperti serpentin, talk, dan smektit, yang terbentuk dari alterasi mineral primer batuan induk (Hai-kuo dkk., 2011; Ribeiro dkk., 2019; Cathelineau dkk., 2019).

Selain itu, garnierit sering dijumpai sebagai mineral silikat kaya nikel yang terkonsentrasi pada zona tertentu dalam endapan laterit. Meskipun kerap diklasifikasikan sebagai bagian dari saprolit, garnierit merepresentasikan fraksi berkadar nikel tinggi yang memiliki nilai ekonomi signifikan (Li dkk., 2015; Cathelineau dkk., 2019). Variasi komposisi mineral dan kadar nikel antar lapisan inilah yang secara langsung menentukan kesesuaian antara jalur hidrometalurgi dan pirometalurgi.

Berbeda dengan tinjauan sebelumnya yang umumnya membahas jalur hidrometalurgi dan pirometalurgi secara terpisah atau berorientasi pada produk feronikel dan baja tahan karat, jurnal ini secara khusus memposisikan kedua jalur pengolahan dalam konteks kebutuhan material baterai kendaraan listrik. Kontribusi utama tinjauan ini terletak pada sintesis komparatif berbasis spesifikasi baterai, yang menempatkan hidrometalurgi sebagai jalur utama produksi nikel berkualitas baterai dan pirometalurgi sebagai tahap prapengolahan yang berpotensi terintegrasi dalam pendekatan hibrida. Dengan demikian, artikel ini memberikan



kerangka evaluasi teknologi yang lebih relevan bagi pengembangan rantai pasok baterai berbasis bijih nikel laterit.

a) Kesesuaian Jalur Hidrometalurgi

Jalur hidrometalurgi secara umum lebih sesuai untuk pengolahan bijih nikel laterit tipe limonit. Hal ini terutama disebabkan oleh beberapa pertimbangan teknis utama. Pertama, proses hidrometalurgi, seperti *High Pressure Acid Leaching* (HPAL), memiliki kemampuan untuk melarutkan nikel dan kobalt secara selektif meskipun bijih mengandung kadar besi yang tinggi (Stanković dkk., 2020). Nikel yang terikat pada oksihidroksida besi dalam bijih limonit dapat diekstraksi secara efektif menggunakan pelindian asam, khususnya asam sulfat.

Kedua, bijih limonit umumnya memiliki kadar nikel yang relatif rendah, berkisar antara 0,8–1,5% Ni, sehingga kurang ekonomis apabila diproses menggunakan jalur pirometalurgi yang memerlukan energi tinggi untuk melelehkan mineral pengotor dalam jumlah besar (Li dkk., 2015; Rizky dkk., 2023). Jalur hidrometalurgi memungkinkan pengolahan bijih berkadar rendah pada temperatur yang lebih rendah dengan efisiensi ekstraksi yang lebih baik (Stanković dkk., 2020).

Ketiga, bijih limonit cenderung mengandung kobalt dalam jumlah yang lebih signifikan dibandingkan saprolit. Proses hidrometalurgi sangat efektif dalam melakukan perolehan bersama (*co-recovery*) nikel dan kobalt, yang keduanya merupakan unsur strategis dalam pembuatan baterai kendaraan listrik (Kursunoglu dkk., 2019; Stanković dkk., 2020). Teknik pemurnian lanjutan, seperti *solvent extraction* (SX), banyak digunakan untuk memisahkan dan memurnikan nikel serta kobalt dari larutan hasil pelindian dalam bentuk sulfat.

Sebagai contoh, proses HPAL yang dioperasikan pada temperatur tinggi (sekitar 250°C) dan tekanan tinggi dilaporkan mampu mencapai tingkat ekstraksi nikel hingga 96–97% dari bijih limonit, terutama dengan penambahan aditif tertentu seperti natrium sulfat. Selain HPAL, metode hidrometalurgi lain seperti *atmospheric leaching* dan *heap leaching* juga dapat diterapkan pada fraksi limonit tertentu maupun zona transisi antara limonit dan saprolit, meskipun dengan tingkat efisiensi yang lebih rendah (Hai-kuo dkk., 2011).

b) Kesesuaian Jalur Pirometalurgi

Sebaliknya, jalur pirometalurgi umumnya lebih sesuai untuk pengolahan bijih nikel laterit tipe saprolit. Kesesuaian ini terutama didasarkan pada kadar nikel yang lebih tinggi, yang umumnya berada pada kisaran 1,5–2,5% Ni, sehingga lebih ekonomis untuk diproses melalui peleburan suhu tinggi (Li dkk., 2015; Rizky dkk., 2023). Kandungan nikel yang lebih tinggi memungkinkan pembentukan produk logam dengan kadar nikel yang lebih terkonsentrasi, seperti feronikel atau NPI.

Proses pirometalurgi, khususnya *Rotary Kiln–Electric Furnace* (RKEF), melibatkan tahap kalsinasi, prereduksi, dan peleburan pada temperatur tinggi yang dapat mencapai sekitar 1600°C di dalam tungku listrik (Keskinilic dkk., 2019). Pada kondisi ini, nikel yang terikat dalam mineral silikat direduksi dan dilebur bersama besi untuk membentuk fase logam cair yang kaya nikel (Jian-ming dkk., 2011; Ya-guang dkk., 2014).

Karakteristik mineralogi bijih saprolit, yang didominasi oleh mineral serpentin dan talk, memerlukan temperatur tinggi untuk dekomposisi dan reduksi yang efektif, sehingga jalur pirometalurgi menjadi pilihan yang lebih sesuai dibandingkan hidrometalurgi (Ribeiro dkk.,



2019). Meskipun konsumsi energi pada proses pirometalurgi relatif tinggi, kadar nikel yang lebih besar pada bijih saprolit mampu mengimbangi kebutuhan energi tersebut dengan menghasilkan produk feronikel berkadar tinggi (Jian-ming dkk., 2011).

Upaya pengembangan teknologi pirometalurgi terus dilakukan untuk menekan konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi, antara lain melalui teknik reduksi selektif yang diikuti dengan pemisahan magnetik. Beberapa studi melaporkan bahwa pemanggangan reduksi pada temperatur sekitar 1200°C dengan waktu tinggal tertentu serta penambahan reduktan dan aditif dapat meningkatkan perolehan feronikel dari bijih laterit berkadar rendah (Wei dkk., 2011; Li dkk., 2014; Tang dkk., 2014).

Secara keseluruhan, komposisi mineralogi dan kadar nikel merupakan faktor utama dalam menentukan pemilihan jalur pengolahan hidrometalurgi atau pirometalurgi untuk bijih nikel laterit (Fan dkk., 2024; Bahfie dkk., 2022). Jalur hidrometalurgi menunjukkan keunggulan dalam pengolahan bijih limonit berkadar rendah dan kaya besi serta berperan penting dalam perolehan kobalt untuk aplikasi baterai kendaraan listrik. Sebaliknya, jalur pirometalurgi tetap menjadi solusi yang andal untuk bijih saprolit berkadar nikel lebih tinggi, khususnya dalam produksi feronikel. Perkembangan ke depan mengarah pada penerapan pendekatan hibrida dan optimasi teknik reduksi selektif guna menjembatani perbedaan karakteristik bijih dan meningkatkan pemanfaatan sumber daya nikel laterit secara menyeluruh (Fan dkk., 2024).

2) Hidrometalurgi

Jalur hidrometalurgi semakin dipandang sebagai teknologi kunci dalam ekstraksi logam kritis, khususnya nikel dan kobalt, dari bijih nikel laterit untuk memenuhi kebutuhan industri baterai kendaraan listrik. Proses-proses ini memanfaatkan larutan kimia berbasis air untuk melarutkan logam target, sehingga menawarkan keunggulan dalam hal efisiensi ekstraksi, selektivitas, serta kemurnian produk, yang merupakan persyaratan utama dalam produksi material berkualitas baterai (battery-grade materials) (Guimarães dkk., 2024).

a) Teknologi Utama: High-Pressure Acid Leaching (HPAL)

High-Pressure Acid Leaching (HPAL) merupakan salah satu metode hidrometalurgi yang paling efektif dan telah banyak diterapkan, khususnya untuk pengolahan bijih nikel laterit tipe limonit. Keunggulan utama HPAL terletak pada kemampuannya menghasilkan perolehan nikel dan kobalt yang tinggi dengan tingkat kemurnian yang sesuai untuk aplikasi baterai (Guimarães dkk., 2024). Proses ini umumnya menggunakan asam sulfat pada kondisi tekanan tinggi dan temperatur elevated, yang sering berada di sekitar 250°C.

Berbagai studi melaporkan bahwa proses HPAL mampu mencapai tingkat ekstraksi nikel yang sangat tinggi. Sebagai contoh, perolehan nikel hingga sekitar 96% telah dilaporkan pada bijih laterit nontronitik, serta hingga 97% pada bijih laterit limonitik dengan penambahan natrium sulfat sebagai aditif proses. Efektivitas pelindian nikel dalam proses HPAL juga dipengaruhi oleh parameter operasi, seperti peningkatan rasio penggunaan asam serta keberadaan ion natrium dalam air proses, yang dapat mempercepat kinetika pelindian.

Kemampuan pelarutan selektif HPAL menjadi aspek yang sangat penting, karena proses ini mampu meliberasi nikel dan kobalt dari matriks bijih yang kaya besi, sekaligus membatasi pelarutan pengotor seperti besi dalam jumlah berlebih (Mystrioti dkk., 2018). Sifat selektif ini

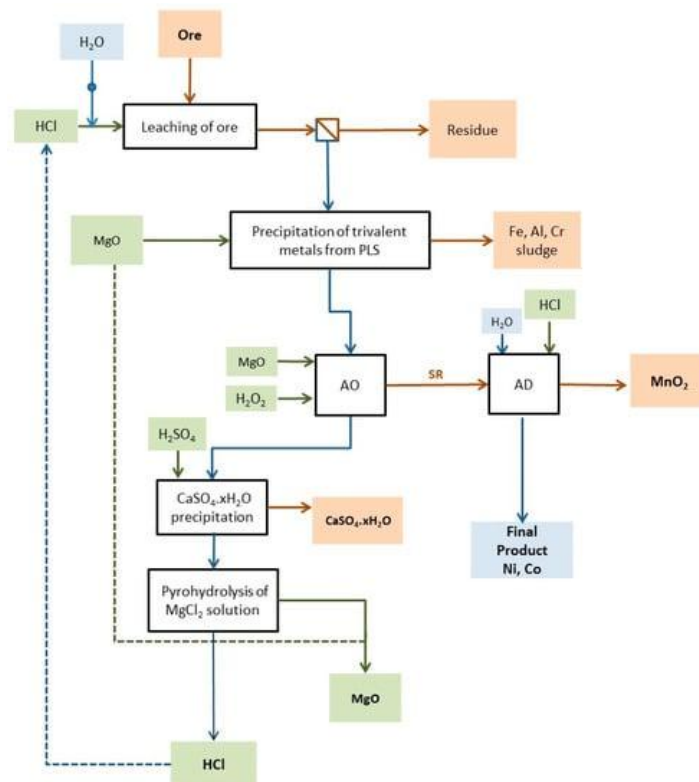
sangat krusial dalam tahap pemurnian selanjutnya, sehingga memungkinkan pencapaian spesifikasi kemurnian yang dipersyaratkan untuk bahan baku baterai kendaraan listrik.

b) Keunggulan Jalur Hidrometalurgi untuk Produksi Material Baterai

Keunggulan utama jalur hidrometalurgi, khususnya HPAL, dalam konteks produksi material baterai terletak pada kemampuannya mengekstraksi nikel dan kobalt secara simultan (*co-recovery*) (Guimarães dkk., 2024). Kobalt merupakan unsur strategis yang berperan penting bersama nikel dalam berbagai sistem katoda baterai modern, seperti baterai berbasis nikel–mangan–kobalt (NMC) (Abdelbaky dkk., 2021).

Berbeda dengan jalur pirometalurgi yang sering kali mengalami kehilangan kobalt ke dalam terak (*slag*), proses hidrometalurgi memungkinkan pemulihan kobalt secara lebih efisien, sehingga meningkatkan nilai tambah dari bijih nikel laterit yang diolah (Stopić dkk., 2020). Setelah tahap pelindian, proses pemurnian lanjutan seperti *solvent extraction* (SX) digunakan untuk memisahkan dan memurnikan nikel dan kobalt dari larutan sulfat hasil pelindian. Tahapan ini menghasilkan prekursor nikel dan kobalt dengan kemurnian tinggi yang diperlukan dalam pembuatan material aktif katoda baterai lithium-ion (Guimarães dkk., 2024).

c) Teknologi Alternatif: Pelindian Atmosferik



Gambar 1. Skema pelindian HCl dalam pengolahan bijih laterit (Mystrioti dkk., 2018)

Selain HPAL, pelindian atmosferik merupakan pendekatan hidrometalurgi alternatif yang menggunakan asam seperti asam sulfat, asam klorida, atau asam nitrat sebagai agen pelindi (Mystrioti dkk., 2018; Pinegar dkk., 2020). Proses ini beroperasi pada tekanan atmosfer, sehingga berpotensi menurunkan biaya investasi awal dibandingkan sistem bertekanan tinggi seperti HPAL.



Beberapa penelitian telah mengevaluasi penerapan pelindian aliran berlawanan (*counter-current leaching*, CCL) menggunakan asam klorida untuk pengolahan bijih laterit saprolit berkadar rendah. Metode ini dilaporkan mampu menghasilkan pelarutan besi yang relatif rendah, sekitar 0,6%, sekaligus mencapai perolehan nikel dan kobalt yang cukup efisien (Mystrioti dkk., 2018).

Secara skematis pada Gambar 1, proses hidrometalurgi berbasis asam klorida melibatkan tahap pelindian bijih, pengendapan logam trivalen, serta tahapan pemurnian lanjutan hingga diperoleh produk akhir berupa nikel dan kobalt. Pendekatan lain juga dilaporkan, seperti penggunaan *copperas* (ferrous sulfate) untuk mengekstraksi magnesium dan nikel dari bijih laterit yang dikombinasikan dengan proses mineralisasi CO₂, sehingga berpotensi memberikan manfaat tambahan dari sisi lingkungan (Gao dkk., 2022). Meskipun demikian, pelindian atmosferik konvensional memiliki keterbatasan utama berupa kinetika reaksi yang relatif lambat dan waktu proses yang panjang, yang dapat menjadi kendala dalam penerapan skala industri dan memengaruhi kelayakan ekonomi proses (Pinegar dkk., 2020).

d) Tantangan Lingkungan Jalur Hidrometalurgi

Di balik keunggulan teknisnya, jalur hidrometalurgi juga menghadapi tantangan lingkungan yang signifikan, terutama terkait dengan pengelolaan residu asam dan limbah cair dalam jumlah besar (*tailings*) (Xiong dkk., 2024). Pengolahan bijih nikel laterit berkadar rendah dapat menghasilkan residu hingga sekitar 80% dari massa umpan, yang umumnya didominasi oleh fase hematit (Xiong dkk., 2024). Kondisi ini menuntut strategi pengelolaan residu yang aman dan berkelanjutan untuk meminimalkan dampak lingkungan.

Berbagai upaya penelitian saat ini difokuskan pada peningkatan pemanfaatan residu hidrometalurgi, antara lain melalui pemulihan unsur bernilai seperti skandium, nikel, dan kobalt dari limbah pelindian menggunakan larutan asam sulfat pada kondisi ambient (Xiong dkk., 2024). Selain itu, pengembangan strategi pemanfaatan yang lebih ramah lingkungan juga mencakup inovasi proses *oxidative pressure acid leaching* yang memungkinkan ekstraksi nikel secara langsung sekaligus menghasilkan produk samping seperti fosfat besi. Pendekatan ini bertujuan untuk menurunkan konsumsi energi serta biaya proses yang umumnya tinggi pada jalur konvensional (Cheng dkk., 2024).

3) Pirometalurgi

Jalur pirometalurgi secara tradisional telah menjadi tulang punggung ekstraksi nikel untuk memenuhi kebutuhan industri baja tahan karat. Namun, meningkatnya permintaan nikel berkualitas baterai mendorong perlunya adaptasi signifikan terhadap teknologi pirometalurgi, khususnya dalam pengolahan bijih nikel laterit. Salah satu proses pirometalurgi yang paling mapan adalah *Rotary Kiln–Electric Furnace* (RKEF), yang secara teknis lebih sesuai untuk mengolah bijih laterit tipe saprolit karena kadar nikelnya yang relatif tinggi serta dominasi mineral silikat dalam komposisinya (Jian-ming dkk., 2011; Keskinilic dkk., 2019).

Secara konvensional, jalur RKEF menghasilkan produk berupa feronikel (FeNi) atau *nickel pig iron* (NPI), yang secara langsung dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku industri baja (Keskinilic dkk., 2019; Fan dkk., 2024). Namun, produk-produk tersebut tidak dapat digunakan secara langsung dalam aplikasi baterai kendaraan listrik, yang mensyaratkan nikel dalam bentuk senyawa sulfat dengan tingkat kemurnian tinggi. Oleh karena itu, jalur



pirometalurgi perlu dimodifikasi agar mampu menghasilkan *nickel matte* sebagai produk antara, yang selanjutnya dapat diolah melalui proses hidrometalurgi menjadi nikel sulfat berkualitas baterai (Li dkk., 2025; Liu dkk., 2025).

Modifikasi jalur pirometalurgi menuju produksi *nickel matte* umumnya dilakukan melalui tahap peleburan bersulfidasi (*sulfidizing smelting*). Pada tahap ini, material pembawa sulfur, seperti pirit, ditambahkan ke dalam muatan tanur untuk mendorong pembentukan fase sulfida nikel, sehingga nikel lebih selektif terkonsentrasi dalam *matte* dibandingkan dalam paduan feronikel (Li dkk., 2025; Liu dkk., 2025). Pendekatan ini membuka peluang bagi pemanfaatan bijih laterit sebagai sumber bahan baku baterai, meskipun melalui jalur proses yang lebih kompleks.

a) Tantangan Utama Jalur Pirometalurgi

Meskipun merupakan teknologi yang telah matang dan andal secara industri, jalur pirometalurgi menghadapi sejumlah tantangan fundamental ketika diarahkan untuk produksi material baterai.

Pertama, dari sisi konsumsi energi, proses pirometalurgi bersifat sangat intensif energi karena memerlukan temperatur peleburan yang sangat tinggi, yang dapat mencapai hingga sekitar 1600°C (Jian-ming dkk., 2011). Kebutuhan energi ini berdampak langsung pada tingginya konsumsi listrik atau batubara, yang pada akhirnya meningkatkan biaya operasional serta emisi gas rumah kaca. Tingginya konsumsi energi terutama disebabkan oleh keharusan untuk melelehkan seluruh matriks bijih serta mereduksi oksida nikel menjadi fase logam atau sulfida.

Kedua, kehilangan kobalt menjadi kelemahan kritis jalur pirometalurgi konvensional dalam aplikasi baterai. Kobalt merupakan unsur strategis yang berperan penting bersama nikel dalam berbagai kimia katoda baterai modern. Namun, pada proses peleburan suhu tinggi, kobalt cenderung terdistribusi ke dalam fase terak (*slag*), sehingga sulit dipulihkan secara ekonomis (Fan dkk., 2024). Kondisi ini menjadikan jalur pirometalurgi kurang ideal untuk pemulihan terpadu nikel dan kobalt yang dibutuhkan dalam rantai pasok baterai kendaraan listrik.

Ketiga, dari aspek lingkungan, selain emisi karbon akibat konsumsi energi tinggi, operasi pirometalurgi juga menghasilkan volume terak dan debu yang besar. Pengelolaan terak dalam jumlah besar memerlukan sistem penanganan yang memadai untuk mencegah dampak negatif terhadap lingkungan sekitar (Jian-ming dkk., 2011).

b) Perkembangan dan Adaptasi Teknologi Pirometalurgi

Untuk mengatasi berbagai keterbatasan tersebut, sejumlah pendekatan baru telah dikembangkan dalam jalur pirometalurgi. Salah satunya adalah penerapan reduksi selektif yang diikuti dengan pemisahan magnetik, yang bertujuan untuk menghasilkan konsentrat feronikel dengan kadar nikel yang lebih tinggi dari bijih laterit berkadar rendah (Wang dkk., 2017). Pendekatan ini memungkinkan peningkatan efisiensi pemanfaatan bijih sekaligus berpotensi menurunkan konsumsi energi total.

Beberapa studi melaporkan bahwa pemanggangan reduksi pada temperatur sekitar 1200°C selama waktu tertentu, dengan penambahan reduktor batubara sekitar 20% dan aditif campuran sekitar 12%, dapat menghasilkan feronikel secara efektif dari bijih laterit berkadar



rendah (Wang dkk., 2017). Selain itu, penggunaan gas pereduksi seperti hidrogen dan karbon monoksida pada rentang temperatur 700–1000°C juga menunjukkan potensi dalam meningkatkan pengayaan feronikel melalui kombinasi proses reduksi dan pemisahan magnetik (Wang dkk., 2017).

Adaptasi penting lainnya adalah integrasi agen sulfurisasi, seperti pirit, dalam proses peleburan untuk secara langsung menghasilkan *nickel matte* dari bijih laterit. Strategi ini memungkinkan jalur pirometalurgi berperan sebagai tahap awal dalam rantai produksi nikel sulfat berkualitas baterai, tanpa harus melalui tahap produksi feronikel terlebih dahulu (Li dkk., 2025; Liu dkk., 2025). Dengan demikian, pendekatan pirometalurgi yang telah dimodifikasi ini berpotensi memperluas pemanfaatan bijih nikel laterit dalam memenuhi spesifikasi ketat bahan baku baterai kendaraan listrik.

ANALISIS KOMPARATIF JALUR HIDROMETALURGI DAN PIROMETALURGI

Pengolahan bijih nikel laterit didominasi oleh dua pendekatan utama, yaitu pirometalurgi dan hidrometalurgi, yang masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan bergantung pada tipe bijih dan produk akhir yang diinginkan. Bijih laterit umumnya diklasifikasikan menjadi bijih limonit, yang dicirikan oleh kadar nikel relatif rendah dan kandungan besi tinggi, serta bijih saprolit, yang memiliki kadar nikel lebih tinggi namun mengandung magnesium dan silika dalam jumlah signifikan (Bahfie dkk., 2022; Xiong dkk., 2024). Variasi mineralogi dan kimia ini menjadi faktor penentu dalam pemilihan jalur ekstraksi yang optimal, karena setiap teknologi memiliki batasan dan keunggulan spesifik terhadap karakteristik bijih tertentu (Li dkk., 2025; Liu dkk., 2025; Wang dkk., 2017).

1) Perbandingan Umum Jalur Hidrometalurgi dan Pirometalurgi

Perbandingan utama antara jalur hidrometalurgi dan pirometalurgi dalam pengolahan bijih nikel laterit untuk aplikasi baterai dapat dirangkum sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Rute Hidrometalurgi dan Pirometalurgi

Parameter	Hidrometalurgi (HPAL / AL)	Pirometalurgi (RKEF / Matte)	Sumber Utama
Jenis bijih yang sesuai	Limonit (kadar Ni rendah, Fe tinggi)	Saprolit (kadar Ni lebih tinggi)	Bahfie dkk. (2022); Xiong dkk. (2024); Wang dkk. (2017)
Kadar nikel tipikal bijih	±0,8–1,5% Ni	±1,5–2,5% Ni	Rizky dkk. (2023); Pickles dkk. (2018)
Recovery nikel	Tinggi (hingga >95%)	Tinggi untuk Ni	Stanković dkk. (2020); Hariyanto dkk. (2023); Wang dkk. (2017)
Recovery kobalt	Tinggi (co-recovery Ni–Co)	Rendah / hilang ke slag	Guimarães dkk. (2024); Xiong dkk. (2024); Fan dkk. (2024)
Bentuk produk utama	Larutan Ni–Co sulfat / MHP / MSP	FeNi, NPI, atau <i>nickel matte</i>	Guimarães dkk. (2024); Li dkk. (2025); Liu dkk. (2025)



Kesesuaian untuk baterai EV	Sangat tinggi (langsung ke prekursor katoda)	Tidak langsung (perlu konversi ke matte/sulfat)	Abdelbaky dkk. (2021); Guimarães dkk. (2024)
Konsumsi energi	Rendah–menengah (sebagian reaksi eksotermik)	Sangat tinggi (reaksi endotermik, suhu tinggi)	Jian-ming dkk. (2011); Hai-kuo dkk. (2013); Sari dkk. (2024)
Temperatur operasi	±200–270 °C (HPAL)	Hingga ±1600 °C	Keskinkilic (2019)

2) Jalur Hidrometalurgi (HPAL/AL)

Jalur hidrometalurgi memanfaatkan larutan kimia berbasis air untuk melarutkan logam dari matriks bijih laterit dan secara umum lebih sesuai untuk bijih limonit yang memiliki kadar nikel rendah, berkisar antara 0,8–1,5% Ni, serta kandungan besi yang tinggi (Bahfie dkk., 2022; Xiong dkk., 2024). Keunggulan utama jalur ini, khususnya melalui proses *High Pressure Acid Leaching* (HPAL), terletak pada kemampuannya mencapai tingkat pemulihan nikel dan kobalt yang tinggi secara simultan, yang merupakan persyaratan penting dalam produksi material katoda baterai kendaraan listrik berbasis nikel–mangan–kobalt (NMC) (Guimarães dkk., 2024; Stanković dkk., 2020).

HPAL umumnya dioperasikan menggunakan asam sulfat pada temperatur tinggi, sekitar 250°C, dan tekanan tinggi untuk melarutkan nikel dan kobalt secara selektif, sekaligus membatasi pelarutan besi (Mystrioti dkk., 2018; Xiong dkk., 2024). Berbagai studi melaporkan bahwa tingkat ekstraksi nikel dapat mencapai hingga 96–97% pada bijih laterit limonitik maupun nontronitik dengan penambahan aditif tertentu seperti natrium sulfat (Hariyanto dkk., 2023). Setelah tahap pelindian, proses pemurnian lanjutan seperti *solvent extraction* (SX) digunakan untuk memisahkan dan memurnikan nikel serta kobalt dari larutan sulfat, sehingga diperoleh prekursor dengan kemurnian tinggi yang sesuai untuk aplikasi baterai (Guimarães dkk., 2024; Kursunoglu dkk., 2019).

Sebagai alternatif, pelindian atmosferik (AL) menawarkan jalur hidrometalurgi dengan kebutuhan investasi yang lebih rendah karena beroperasi pada tekanan atmosfer. Proses ini dapat menggunakan berbagai jenis asam, seperti asam sulfat, klorida, atau nitrat, dan dilaporkan mampu mencapai pelarutan nikel dan kobalt dengan pelarutan besi yang relatif rendah, misalnya sekitar 0,6% pada pelindian asam klorida untuk bijih saprolit berkadar rendah (Mystrioti dkk., 2018). Namun, keterbatasan utama pelindian atmosferik adalah kinetika reaksi yang lebih lambat dan waktu proses yang lebih panjang dibandingkan HPAL, sehingga berpotensi membatasi kapasitas produksi industri. Pengembangan teknologi baru, seperti pemanggangan–pelindian berbantuan gelombang mikro, mulai dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi proses pada kondisi tekanan atmosfer (Muhammad dkk., 2025).

Di sisi lain, jalur hidrometalurgi menghadapi tantangan lingkungan yang signifikan, terutama terkait pengelolaan residu asam dan tailings. Pengolahan bijih nikel laterit berkadar rendah dapat menghasilkan residu hingga sekitar 80% dari massa umpan, yang sebagian besar berupa hematit (Ikhwani dkk., 2023). Oleh karena itu, strategi pengelolaan residu yang berkelanjutan, termasuk pemulihan unsur bernilai seperti skandium, nikel, dan kobalt dari limbah hidrometalurgi, menjadi fokus penting dalam pengembangan teknologi ke depan (Wei dkk., 2024).

3) Jalur Pirometalurgi (RKEF/Matte)

Jalur pirometalurgi dicirikan oleh perlakuan suhu tinggi terhadap bijih laterit dan dikenal sebagai teknologi yang matang, sederhana secara proses, serta andal secara industri (Jian-ming dkk., 2011). Proses *Rotary Kiln–Electric Furnace* (RKEF) merupakan metode pirometalurgi yang paling umum digunakan dan terutama diaplikasikan pada bijih saprolit yang memiliki kadar nikel lebih tinggi, umumnya pada kisaran 1,5–2,5% Ni (Keskinkilic, 2019; Wang dkk., 2017; Pickles dkk., 2018). Proses RKEF ditunjukkan pada gambar 2. Kandungan nikel yang lebih tinggi ini secara ekonomis dapat mengimbangi kebutuhan energi yang besar pada proses peleburan suhu tinggi.

Proses RKEF melibatkan tahap kalsinasi, prareduksi, dan peleburan pada temperatur yang dapat mencapai hingga 1600°C, menghasilkan produk berupa feronikel atau *nickel pig iron* yang lazim digunakan dalam industri baja tahan karat (Jian-ming dkk., 2011; Keskinkilic, 2019). Namun, produk tersebut tidak sesuai secara langsung untuk aplikasi baterai kendaraan listrik yang memerlukan nikel sulfat berkadar tinggi.



Gambar 2. Proses RKEF (Keskinkilic, 2019)

Untuk mengadaptasi jalur pirometalurgi ke arah aplikasi baterai, diperlukan modifikasi proses guna menghasilkan *nickel matte* sebagai produk antara. Modifikasi ini umumnya dilakukan melalui peleburan bersulfidasi dengan menambahkan bahan pembawa sulfur, seperti pirit, ke dalam muatan tanur, sehingga mendorong pembentukan fase sulfida nikel (Li dkk., 2025; Liu dkk., 2025; Abbas dkk., 2025). Pendekatan ini memungkinkan nikel laterit diproses melalui jalur pirometalurgi sebelum akhirnya dimurnikan secara hidrometalurgi menjadi nikel sulfat berkualitas baterai.

Meskipun demikian, jalur pirometalurgi tetap menghadapi keterbatasan utama berupa konsumsi energi yang sangat tinggi, emisi gas rumah kaca yang signifikan, serta rendahnya efisiensi pemulihan kobalt, yang umumnya terdistribusi ke dalam fase terak selama proses peleburan (Jian-ming dkk., 2011; Sari dkk., 2024; Wang dkk., 2017). Selain itu, produksi terak dan debu dalam jumlah besar menimbulkan tantangan lingkungan yang memerlukan sistem pengelolaan yang memadai (Rosenberg dkk., 2023).

Berdasarkan perbandingan menyeluruh terhadap aspek teknis, energi, dan lingkungan, dapat disimpulkan bahwa pemilihan jalur pengolahan nikel laterit untuk aplikasi baterai tidak semata-mata ditentukan oleh efisiensi ekstraksi nikel, tetapi oleh kemampuan sistem proses dalam menghasilkan nikel dan kobalt dengan kemurnian tinggi serta jejak lingkungan yang terkendali. Jalur hidrometalurgi menunjukkan keunggulan yang konsisten dalam memenuhi kebutuhan tersebut, sementara jalur pirometalurgi, meskipun unggul dalam kapasitas dan kecepatan proses, memerlukan adaptasi signifikan agar relevan bagi aplikasi baterai.



4) Pertimbangan Teknologi dalam Pemilihan Jalur Pengolahan Bijih Nikel Laterit

Secara keseluruhan, jalur pirometalurgi menawarkan keunggulan berupa kesederhanaan proses dan waktu pengolahan yang relatif cepat, tetapi dibatasi oleh konsumsi energi yang tinggi serta kehilangan kobalt yang signifikan, sehingga kurang ideal untuk produksi material baterai kendaraan listrik (Abdelbaky dkk., 2021; Stanković dkk., 2020). Sebaliknya, jalur hidrometalurgi, meskipun memiliki waktu proses yang lebih panjang dan tantangan pengelolaan limbah asam, menunjukkan keunggulan yang jelas dalam pemulihan terpadu nikel dan kobalt serta kemampuan menghasilkan prekursor dengan kemurnian tinggi yang dibutuhkan untuk aplikasi baterai (Guimarães dkk., 2024; Xiong dkk., 2024).

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa inovasi pada jalur pirometalurgi, khususnya melalui proses reduksi selektif, berpotensi menjadi integrasi rute diantara keduanya. Reduksi selektif bertujuan untuk menekan konsumsi energi dibandingkan RKEF konvensional dengan cara memperkaya nikel dalam konsentrat sebelum tahap pemurnian lanjutan (Wang dkk., 2017; Sari dkk., 2024). Sebagai contoh, pemanggangan reduksi pada temperatur sekitar 1200°C selama 180 menit dengan penambahan reduktor dan aditif tertentu dilaporkan mampu menghasilkan konsentrat feronikel dari bijih laterit berkadar rendah secara lebih efisien (Wang dkk., 2017). Penggunaan aditif seperti natrium sulfat juga dilaporkan mampu meningkatkan kadar nikel dalam konsentrat hingga di atas 5%, sehingga material tersebut berpotensi menjadi bahan baku antara yang selanjutnya dapat diolah melalui jalur hidrometalurgi untuk aplikasi baterai (Tang dkk., 2014; Abbas dkk., 2025).

5) Tantangan Masa Depan dan Rekomendasi

Pengembangan berkelanjutan teknologi ekstraksi bijih nikel laterit untuk material baterai kendaraan listrik masih menghadapi tantangan signifikan, terutama pada aspek lingkungan dan efisiensi proses. Pada jalur hidrometalurgi, isu utama berkaitan dengan pengelolaan limbah asam dan *tailings* dalam jumlah besar, sehingga diperlukan inovasi yang berfokus pada pemanfaatan residu secara menyeluruh, pengolahan air limbah yang berkelanjutan, serta pemulihan unsur bernilai seperti skandium, nikel, dan kobalt dari limbah hidrometalurgi berbasis larutan asam sulfat pada kondisi ambient (Pinegar dkk., 2020; Ikhwan dkk., 2023). Upaya tersebut menjadi prasyarat penting agar jalur hidrometalurgi dapat berkembang sebagai teknologi yang lebih ramah lingkungan dan relevan bagi industri baterai kendaraan listrik.

Sementara itu, pengembangan jalur pirometalurgi diarahkan pada peningkatan efisiensi energi dan pengurangan kehilangan kobalt selama proses peleburan. Dalam konteks ini, pendekatan terpadu yang mengombinasikan keunggulan pirometalurgi dan hidrometalurgi dipandang sebagai strategi yang menjanjikan untuk memenuhi spesifikasi ketat material baterai kendaraan listrik (Kolmachikhina dkk., 2014; Li dkk., 2015). Pendekatan tersebut dapat melibatkan tahap praperlakuan pirometalurgi atau reduksi selektif untuk menghasilkan produk antara yang diperkaya nikel, yang selanjutnya dimurnikan melalui jalur hidrometalurgi guna memperoleh produk akhir berkualitas baterai dengan kemurnian tinggi, sekaligus menyeimbangkan aspek efisiensi energi, kapasitas produksi, dan keberlanjutan proses.



KESIMPULAN

Jalur hidrometalurgi saat ini merupakan pendekatan yang paling relevan dan efisien untuk produksi bahan baku baterai kendaraan listrik dari bijih nikel laterit. Keunggulan utama jalur ini terletak pada kemampuannya melakukan pemulihan nikel dan kobalt secara simultan dengan tingkat kemurnian tinggi, yang merupakan persyaratan fundamental bagi material katoda baterai modern. Proses hidrometalurgi, khususnya *high-pressure acid leaching*, memungkinkan pemanfaatan bijih limonit berkadar rendah yang sebelumnya kurang ekonomis, sekaligus menghasilkan prekursor nikel dan kobalt yang dapat langsung diintegrasikan ke dalam rantai pasok baterai.

Sebaliknya, jalur pirometalurgi tetap memiliki peran strategis dalam pengolahan bijih saprolit berkadar nikel lebih tinggi dan masih menjadi tulang punggung industri nikel secara global. Namun, dalam konteks produksi material baterai kendaraan listrik, jalur ini dihadapkan pada keterbatasan berupa konsumsi energi yang sangat tinggi dan kehilangan kobalt yang signifikan. Oleh karena itu, arah pengembangan teknologi yang paling rasional ke depan bukanlah menggantikan sepenuhnya salah satu jalur, melainkan mengintegrasikan pirometalurgi sebagai tahap prapengolahan atau reduksi selektif yang kemudian diikuti oleh pemurnian hidrometalurgi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, M., Shu-Heng, C., & Long-gong, X. (2025). Sulfidation of Saprolite Nickel Laterite Ore with Sodium Sulfate as Sulfur Resource. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 42(4), 2635–2650. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01120-0>
- Abdelbaky, M., Schwich, L., Crenna, E., Peeters, J. R., Hischier, R., Friedrich, B., & Dewulf, W. (2021). Comparing the environmental performance of industrial recycling routes for lithium nickel-cobalt-manganese oxide 111 vehicle batteries. *Procedia CIRP*, 98, 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.012>
- Bahfie, F., Manaf, A., Astuti, W., Nurjaman, F., Prastyo, E., & Herlina, U. (2022). Development of laterite ore processing and its applications. *Indonesian Mining Journal*, 25(2), 89–104. <https://doi.org/10.30556/imj.vol25.no2.2022.1261>
- Cathelineau, M., Boiron, M.-C., Grimaud, J.-L., Favier, S., Teitler, Y., & Golfier, F. (2023). Pseudo-Karst Silicification Related to Late Ni Reworking in New Caledonia. *Minerals*, 13(4), 518. <https://doi.org/10.3390/min13040518>
- Cheng, Y., Wang, Y., Gu, K., & Han, J. (2025). Green Utilization Strategy of Nickel–Iron Alloy: Selective Extraction of Nickel and Direct Preparation of Iron Phosphate. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11(2), 1571–1586. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01067-6>



- Fan, Q., Yuan, S., Wen, J., & He, J. (2024). Review on comprehensive utilization of nickel laterite ore. *Minerals Engineering*, 218, 109044. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109044>
- Gao, Y., Jin, X., Gao, Y., Rohani, S., He, M., Li, J., Ren, S., Liu, Q., & Liu, W. (2022). Separation of Nickel and Magnesium from Laterite Ore for Simultaneous Co2 Mineralization and Nickel Recovery by Using Waste Copperas. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4012744>
- Guimarães, A. S., Resende, G. P. de S., Santos, I. D. dos, & Mansur, M. B. (2024). Development of a conceptual direct solvent extraction (DSX) route and a flowsheet to produce purified concentrated cobalt and nickel solutions representing sulfuric acid leach liquor of laterite. *Hydrometallurgy*, 227, 106321. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106321>
- Hai-kuo, F., Ya-qin, W., Yu-xing, M., Yi, Z., & Cai-feng, Z. (2013). Research Progress on Comprehensive Utilization of Magnesium from Leaching Liquor of Nickel Laterite Ore in Hydrometallurgical Process. In *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*.
- Hariyanto, R. K. S., Tomas da Rocha, L., Kim, S.-J., & Jung, S.-M. (2023). Influence of Alkali Salts on Extraction of Nickel From Serpentine-Rich Ore Through Sulfation Roasting Leaching Process. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9(4), 1636–1646. <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00753-7>
- Ikhwan, N., Harjanto, S., Kawigraha, A., Andrameda, Y. A., & Permatasari, N. V. (2023). Laterite nickel hydrometallurgical residues characterization and potential utilization of valuable elements. In *AIP Conference Proceedings* 2828 (1), 2023.
- Jian-ming, P., Pei-min, G., & Pei, Z. (2011). Analysis on Pyrometallurgy Technologies of Laterite-Nickel Ore. In *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH*.
- Keskinkilic, E. (2019). Nickel Laterite Smelting Processes and Some Examples of Recent Possible Modifications to the Conventional Route. *Metals*, 9(9), 974. <https://doi.org/10.3390/met9090974>
- Kolmachikhina, O. B., Polygalov, S. E., & Vakula, K. A. (2021). The Study of Physicochemical Features of Laterite Ores of the Buruktalsky Deposit. *Solid State Phenomena*, 316, 694–698. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.316.694>
- Kursunoglu, S., & Kaya, M. (2019). Hydrometallurgical processing of nickel laterites-a brief overview on the use of solvent extraction and nickel/cobalt project for the separation and purification of nickel and In *Scientific Mining Journal* 58 (2), 131-144, 2019.
- LI, J., LI, Y., ZHENG, S., XIONG, D., CHEN, H., & ZHANG, Y. (2015). Research review of laterite nickel ore metallurgy. In *Nonferrous Metals Science and Engineering*.



- Li, X. H., Tuo, B. Y., Zhang, Q., & Zhang, S. J. (2014). Experimental Study on Recovery of Nickel from Nickel-Bearing Laterite. *Advanced Materials Research*, 881–883, 1611–1615. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.881-883.1611>
- Li, Z., Tian, Q., Wang, Q., Zulhan, Z., Wang, S., Hidayat, T., & Guo, X. (2025). Preparation of Nickel Matte from Laterite Nickel Ore Using Pyrite as the Sulfurization Agent. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 56(5), 4964–4976. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03607-7>
- Liu, W., Liu, S., Ling, H., Li, C., & Jiao, F. (2025). Production of nickel matte from saprolitic laterite ore by sulfide smelting with pyrite. *Minerals Engineering*, 233, 109658. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109658>
- Muhammad, A. J., Nakagawa, K., Karya, I. P. A., Ndita, A., Darusman, L. O. M., Iwamoto, T., Terui, Y., Agus, L., Sudiana, I. N., Nishimura, F., Nishiumi, T., Asano, T., Kikuchi, H., & Mitsudo, S. (2025). Microwave-Assisted Roasting-Leaching of Nickel from Indonesian Nickel Laterite Ore. *International Journal of Acta Material*, 1(2), 73–83. <https://doi.org/10.62749/ijactmat.v1i2.10>
- Mystrioti, C., Papassiopi, N., Xenidis, A., & Komnitsas, K. (2018). Counter-Current Leaching of Low-Grade Laterites with Hydrochloric Acid and Proposed Purification Options of Pregnant Solution. *Minerals*, 8(12), 599. <https://doi.org/10.3390/min8120599>
- Peng, Z. (2011). The Latest and Future Development of Laterite Nickel Ore Processing Technology. In *Rare Metals and Cemented Carbides*.
- Pickles, C. A., & Anthony, W. (2018). Thermodynamic modelling of the reduction of a saprolitic laterite ore by methane. *Minerals Engineering*, 120, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.006>
- Pinegar, H., & Smith, Y. R. (2020). Recycling of End-of-Life Lithium-Ion Batteries, Part II: Laboratory-Scale Research Developments in Mechanical, Thermal, and Leaching Treatments. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6(1), 142–160. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00265-8>
- Ribeiro, P. P. M., Neumann, R., Santos, I. D. dos, Rezende, M. C., Radino-Rouse, P., & Dutra, A. J. B. (2019). Nickel carriers in laterite ores and their influence on the mechanism of nickel extraction by sulfation-roasting-leaching process. *Minerals Engineering*, 131, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.022>
- Rizky, M. A., Sukanto, U., & Setiawan, A. (2023). Literature Review: Comparison of Caron Process and RKEF On The Processing of Nickel Laterite Ore For Battery. *Jurnal Mineral, Energi, Dan Lingkungan*, 6(2), 47. <https://doi.org/10.31315/jmel.v6i2.6900>
- Rosenberg, S., Kurz, L., Huster, S., Wehrstein, S., Kiemel, S., Schultmann, F., Reichert, F., Wörner, R., & Glöser-Chahoud, S. (2023). Combining dynamic material flow analysis



- and life cycle assessment to evaluate environmental benefits of recycling – A case study for direct and hydrometallurgical closed-loop recycling of electric vehicle battery systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107145. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107145>
- Sari, Y., Manaf, A., Astuti, W., Haryono, T., Nurjaman, F., & Bahfie, F. (2024). Recovery of ferronickel by green selective reduction of nickel laterite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1388(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1388/1/012026>
- Stanković, S., Stopić, S., Sokić, M., Marković, B., & Friedrich, B. (2020). Review of the past, present, and future of the hydrometallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores. *Metallurgical and Materials Engineering*, 26(2), 199–208. <https://doi.org/10.30544/513>
- Stopić, S., R., & Friedrich, B., G. (2020). Recovery of cobalt from primary and secondary materials: An overview. *Vojnotehnicki Glasnik*, 68(2), 321–337. <https://doi.org/10.5937/vojtehg68-26117>
- Tang, X., Liu, R., Yao, L., Ji, Z., Zhang, Y., & Li, S. (2014). Ferronickel enrichment by fine particle reduction and magnetic separation from nickel laterite ore. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 21(10), 955–961. <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0995-5>
- Wang, Z., Chu, M., Liu, Z., Wang, H., Zhao, W., & Gao, L. (2017). Preparing Ferro-Nickel Alloy from Low-Grade Laterite Nickel Ore Based on Metallized Reduction–Magnetic Separation. *Metals*, 7(8), 313. <https://doi.org/10.3390/met7080313>
- Wei, J. M., Wang, W. W., Ma, M. S., Sun, N. L., Qin, B., Li, M. C., Du, G. S., Lv, D., Liu, G., Peng, J. H., Lu, Y. D., & Liu, C. (2024). Recovery of Scandium, Nickel and Cobalt from Hydrometallurgical Waste of Laterite. *Journal of Physics: Conference Series*, 2686(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2686/1/012004>
- Wei, L., Hui, W., Jian-gang, F., & Zhang-xing, H. (2011). High Recovery of Ferro-Nickel from Low Grade Nickel Laterite Ore. In *Journal of Central South University*.
- Xiong, X., Ma, B., Li, X., Yu, J., Shi, L., Wang, C., & Chen, Y. (2024). Hydrometallurgical process and recovery of valuable elements for limonitic laterite: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 73, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.05.011>
- Ya-guang, G., Rong, Z., Ming, L., Ming-wei, G., Yong-wei, W., & Chun-fang, Z. (2014). Extraction of a nickel-iron alloy from nickel laterite ore through selective reduction and smelting process. In *Journal of University of Science and Technology Beijing*.