E-ISSN : 3025-1311
https://ejournal.warunayama.org/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 10 No 7 Tahun 2025

HILIRISASI RESIDU NIKEL: TRANSFORMASI *SLAG* NIKEL MENJADI MATERIAL GEOPOLIMER BERKINERJA TINGGI

Alieftiyani Paramita Gobel[1], Fitray Virnando[2], Nugraha Try Septianto[3], Elman Pratama Silaban[4]
[1-4] Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
Institution/affiliation; Jalan Srijaya Negara, Bukit Lama, Kec. Ilir Barat I, Kota Palembang, Sumatera Selatan, 0711-580664
e-mail: *elmanpratama81@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia mempunyai endapan nikel laterit yang terbentuk melalui proses pelapukan batuan ultramafik dalam iklim tropis, yang menghasilkan karakteristik mineralogi dan geokimia yang kompleks. Kondisi ini menyebabkan proses ekstraksi nikel menjadi menantang, terutama akibat tingginya kadar air serta keberadaan unsur pengotor seperti magnesium, silika, dan besi dalam konsentrasi tinggi. Oleh karena itu, pemilihan teknologi pengolahan sangat ditentukan oleh karakteristik fisikokimia bijih, khususnya tipe laterit dan kadar nikelnya. Teknologi pirometalurgi, khususnya *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF), masih mendominasi industri nikel Indonesia karena kemampuannya mengolah bijih saprolit dengan kadar nikel relatif tinggi secara efektif. Proses RKEF menghasilkan produk utama berupa feronikel serta produk samping berupa *slag* nikel dalam jumlah besar. *Slag* nikel umumnya mengandung silika dan alumina dalam kadar tinggi, sehingga memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi, terutama dalam beton geopolimer. Namun demikian, *slag* nikel juga mengandung logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola secara tepat. Beton geopolimer berbasis *slag* nikel memanfaatkan material aluminosilikat yang diaktifkan secara alkali untuk membentuk matriks polimer anorganik yang kuat dan stabil. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *slag* nikel sebagai agregat atau material prekursor pada komposisi tertentu dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer. Selain peningkatan kinerja mekanis, matriks geopolimer juga terbukti efektif dalam mengimobilisasi logam berat bawaan *slag* melalui mekanisme enkapsulasi fisik, ikatan kimia, adsorpsi, dan substitusi ion. Dengan demikian, pemanfaatan *slag* nikel sebagai beton geopolimer merupakan solusi berkelanjutan yang meningkatkan nilai tambah limbah industri sekaligus mendukung upaya pengurangan risiko lingkungan dan hilirisasi nikel.

Kata Kunci : Nikel Laterit, *Rotray Klin-Electric Furnace*, *Slag* Nikel, Geopolimer, Imobilisasi Logam Berat

Article History
Received: Desember 2025
Reviewed: Desember 2025
Published: Desember 2025

Plagiarism Checker No 802
Prefix DOI : Prefix DOI : 10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

ABSTRACT

Indonesia has laterite nickel deposits formed through the weathering of ultramafic rocks in a tropical climate, resulting in complex mineralogical and geochemical characteristics. These conditions make nickel extraction challenging, mainly due to high water content and the presence of impurities such as magnesium, silica, and iron in high concentrations. Therefore, the selection of processing technology is largely determined by the physicochemical characteristics of the ore, particularly the type of laterite and its nickel content. Pyrometallurgical technology, specifically Rotary Kiln-Electric Furnace (RKEF), still dominates the Indonesian nickel industry due to its ability to effectively process saprolite ore with relatively high nickel content. The RKEF process produces ferronickel as the main product and large amounts of nickel slag as a by-product. Nickel slag generally contains high levels of silica and alumina, making it a potential material for use in construction, especially in geopolymer concrete. However, nickel slag also contains heavy metals that have the potential to pollute the environment if not managed properly. Nickel slag-based geopolymer concrete utilizes alkali-activated aluminosilicate materials to form a strong and stable inorganic polymer matrix. Various studies have shown that the use of nickel slag as an aggregate or precursor material in certain compositions can increase the compressive strength and flexural strength of geopolymer concrete. In addition to improved mechanical performance, the geopolymer matrix has also been proven effective in immobilizing heavy metals inherent in slag through physical encapsulation, chemical bonding, adsorption, and ion substitution mechanisms. Thus, the use of nickel slag as geopolymer concrete is a sustainable solution that increases the added value of industrial waste while supporting efforts to reduce environmental risks and nickel downstreaming.

***Keywords**: Nickel Laterite, Rotary Kiln-Electric Furnace, Nickel Slag, Geopolymer, Heavy Metal Immobilization*

PENDAHULUAN

Bijih nikel terutama terdapat dalam bentuk laterit dan sulfida, dengan laterit nikel menyumbang sekitar 70% dari total cadangan nikel dunia [1]. 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 [2].

Teknologi ekstraksi nikel telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, dengan berbagai pendekatan yang dikembangkan untuk mengoptimalkan *recovery* nikel dari bijih laterit.

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 [3]. 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 [4].

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 [5]. 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 [6].

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 [7]. Kandungan nikel yang lebih tinggi memungkinkan pembentukan produk logam dengan kadar nikel yang lebih terkonsentrasi, seperti feronikel atau NPI (*Nickel Pig Iron*).

Terak (*slag*) adalah produk limbah dan produk sampingan, yang berasal dari pemrosesan biji metalik atau industri. Secara umum terak yang dihasilkan ada dua jenis yaitu terak *ferrous* (besi/baja) dan terak *non-ferrous* (bukan besi/baja). Pemrosesan dan penggunaan kembali terak menjadi hal yang menarik untuk diteliti dan didiskusikan karena kandungan yang dimiliki terak yang berpotensi daur-ulang atau kemungkinan untuk dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku sekunder pada beberapa sektor semisal pada bidang konstruksi [8].

Slag merupakan hasil sampingan dari industri logam setelah dipisahkan dari biji mentahnya. *Slag* merupakan limbah B3 yang dapat mencemari lingkungan. Dan karena jumlahnya yang banyak dan tidak dimanfaatkan, *slag* nikel dapat mengancam kesehatan dan ekosistem lingkungan [9].

Slag nikel berpotensi melepaskan unsur – unsur beracun seperti Pb, Zn, As, Cd dan Co yang sangat berdampak buruk bagi lingkungan maupun manusia. *Slag* atau terak nikel sampingan merupakan dari produksi produk nikel [10]. Beton polimer adalah beton yang menggunakan bahan polimer sebagai pengikatnya menggantikan semen portland. Polimer adalah rantai berulang dari atom yang panjang, terbentuk dari pengikat yang berupa molekul identik yang disebut monomer. Salah satu contohnya ialah ikatan Si-O-Al-O sehingga bahan yang digunakan harus mengandung banyak Aluminium (Al) dan Silikon (Si) yang bisa ditemukan di tanah liat, kaolinit, silica fume, dan *Fly Ash* [11].

Dalam pembuatan beton geopolimer diperlukan material – material seperti agregat kasar, agregat halus, *fly ash,* alkali, dan aquades. *Slag* nikel berperan sebagai agregat halus dimana penambahan *slag* nikel memberikan keuntungan sebagai berikut [12]:

1) Mempertinggi kekuatan tekan beton
2) Menaikkan ratio antara kelenturan dan kuat tekan beton
3) Mempertinggi ketahanan terhadap sulfat dalam air laut
4) Mengurangi panas hidrasi dan menurunkan suhu
5) Memperbaiki penyelesaian akhir dan memberi warna cerah pada beton
6) Mengurangi porositas dan serangan klorida

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hermana Kaselle dan Raynaldo Bunga Allo (2021) dalam jurnal "*Journal of Applied Civil and Evironmental Engineering*" dengan judul Pengaruh Penggunaan *Slag* Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer [13] didapatkan bahwasannya terak atau *slag* nikel yang dicampurkan kedalam pembuatan beton geopolimer sebagai agregat halus mendapatkan hasil yang positif terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh Ibnu Jamil Khairi dkk., (2020) dalam jurnal "Jurnal Infrastruktur" dengan judul *Review* Kakteristik Mekanik dan *Toxicity Charcteristic Leaching Procedure* Beton Geopolimer, didapatkan hasil bahwa penggunaan *slag* nikel dalam kadar yang tepat dapat meningkatkan kuat tekan dari material beton geopolimer tersebut. Sebaliknya, apabila penggunaan kadar nikel sebagai bahan campuran tidak tepat maka akan menurunkan kekuatan dari kinerja material itu sendiri [14].

Penelitian yang dilakukan oleh Syamsul Bahri Ahmad dam Ramlan Sultan (2020), dalam "Prosiding 4 Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2020" dengan judul "Studi Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbasis *Fly Ash-Slag* dengan Rasio Aktivator Na_2SiO_3 dan NaOH Berbeda." Dari penelitian tersebut dihasilkan bahwasannya kuat tekan mortal geopolimer menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi pada umur 7, 14, dan 28 hari dibandingkan kuat tekan mortar konvensional [15].

Berdasarkan penelitian – penelitian terdahulu yang menjadi acuan penulisan artikel ini, adapun tujuan dari penulisan artikel ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa seberapa efektif metode ekstraksi pirometalurgi dalam memisahkan dan mengambil kembali sisa logam nikel yang terperangkap dalam residu dengan metode *Rotary Klin Electric Furnace* (RKEF), serta apa saja indikasi yang menjadi indikator bahwa proses ekstraksi tersebut berhasil.
2. Sejauh mana konsentrasi residu nikel yang tersisa pasca-ekstraksi memengaruhi proses polimerisasi dan kekuatan mekanis (kinerja tinggi) dari material geopolimer yang dihasilkan.
3. Seberapa efektif struktur matriks geopolimer dalam mengikat (imobilisasi) sisa – sisa senyawa nikel agar tidak terlindi (*leaching*) ke lingkungan, sehingga produk transformasi *slag* tersebut memenuhi standar keamanan material konstruksi.

METODE PENELITIAN

Artikel ini disusun berdasarkan hasil studi Pustaka terkait transformasi *slag* nikel hasil dari proses ekstraksi dengan metode *Rotary Klin Electric Furnace* (RKEF) menjadi produk geopolimer sebagai bentuk dari hilirisasi nikel. Metode penelitian meliputi pengambilan data sekunder dari penelitian terdahulu terkait keefektivitasan metode RKEF dalam mengekstraksi nikel dan menghasilkan residu terak nikel, pengaruh konsentrasi residu nikel terhadap kinerja dari material geopolimer, dan keefektivitasan geopolimer dari terak nikel dalam mengikat senyawa nikel agar tidak terlindi ke lingkungan agar material tersebut memenuhi standar keamanan material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penggunaan Metode *Rotary Klin Electric Furnace* (RKEF) dalam mengekstraksi bijih nikel

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 [16].

Proses pirometalurgi, khususnya *Rotary Kiln -Electric Furnace* (RKEF), melibatkan tahap kalsinasi, prareduksi, dan peleburan pada temperatur tinggi yang dapat mencapai sekitar 1600°C di dalam tungku listrik [17]. Pada kondisi ini, nikel yang terikat dalam mineral silikat direduksi dan dilebur bersama besi untuk membentuk fase logam cair yang kaya nikel.

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 [18] Karenanya hampir semua proses pengolahan nikel laterit menggunakan proses pirometalurgi terhadap kandungan nikel yang diatas 1,5%. Padahal lebih dari 50% cadangan dunia mempunyai kandungan Ni < 1,45%.

Proses RKEF banyak digunakan untuk menghasilkan feronikel dan nikel-*matte*. Proses ini diawali dengan pengeringan kandungan *moisture* hingga 45% melalui proses *pretreatment*. Pada proses tersebut, bijih laterit dikeringkan dengan *rotary dryer* pada temperatur 250°C hingga kandungan moisture nya mencapai 15-20%. Produk dari rotary dryer selanjutnya masuk ke-tahap kalsinasi (pre reduksi) menggunakan rotary kiln pada suhu 800 - 900°C. adapun reaksi yang berlangsung di *rotary kiln*, yaitu: evaporasi dari air, disosiasi dari mineral-mineral pada temperatur 7000°C menjadi oksida - oksida dan uap air, reduksi dari nikel oksida dan besi oksida gas reduktor pada temperatur sekitar 8000°C. Hasil proses kalsinasi kemudian dilebur di dalam electric furnace pada temperatur 1500-16000°C menghasilkan feronikel [19].

Efektivitas dari metode *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) dipengaruhi oleh ukuran partikel, rasio udara terhadap bahan bakar, reaksi pembakaran, dan perpindahan panas di dalam *rotary kiln* [20].

Proses produksi feronikel melalui teknologi pirometalurgi menghasilkan slag nikel sebagai produk samping dengan rasio 12 - 15 ton *slag* per ton feronikel yang diproduksi [21]. Berdasarkan data Kementerian Perindustrian, produksi slag nikel Indonesia mencapai 13 juta ton per tahun dan diproyeksikan terus meningkat seiring dengan pengembangan *smelter* nikel baru [22].

Slag nikel memiliki karakteristik fisik dan kimia yang menarik untuk aplikasi konstruksi. Komposisi kimia slag nikel umumnya mengandung 40-50% SiO2, 10 - 15% Al_2O_3, 6 - 12% CaO, 25 - 35% FeO, dan 8 - 15% MgO [23], Kandungan silika dan alumina yang tinggi memberikan potensi aktivitas pozzolan yang dapat meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton. Selain itu, struktur kristal slag nikel yang amorf memungkinkan terjadinya reaksi kimia dengan senyawa alkali dalam semen [24].

Limbah atau *slag* yang dihasilkan oleh ekstraksi nikel dapat dimanfaatkan sebagai agregat beton, pengerasan jalan tambang, dll. Hal ini juga bisa mencegah resiko pencemaran lingkungan dan bisa mengurangi atau meminimalisir penumpukan limbah *slag* ditempat pembuangan [25] berdasarkan hal tersebut konsep ini juga mendukung

program hilirisasi nikel yang menjadikan limbah nikel menjadi produk yang memiliki nilai jual.

B. Pengaruh Konsentrasi Residu *slag* Nikel terhadap Proses Polimerasi dan Kekuatan Mekanis dalam Menghasilkan Produk Material Geopolimer

Secara umum, proses produksi beton geopolimer adalah persiapan material *precursor* yang mengandung silika dan alumina yang tinggi seperti *fly ash*, metakaolin, *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), kemudian persiapan agregat kasar dan halus. Selanjutnya, material *precursor*, aggregat halus, dan aggregat kasar dicampur. Persiapan larutan alkali yaitu NaOH padat dan cairan Na_2SiO_3 dicampur hingga larutan homogen. Kemudian campuran agregat dan material *precursor* dicampur larutan alkali, dan dilanjutkan dengan pelaksanaan *curing* pada beton sesuai metode dan durasi yang ditentukan [26].

Reaksi polimerisasi pada beton geopolimer tidak membutuhkan peranan air, sebaliknya hasil dari reaksi polimerisasi salah satunya adalah air [27]. Air dapat memengaruhi kinerja (*workability*) pada beton segar.

Beton geopolimer memiliki kelebihan yaitu kuat tekan pada umur awal beton mampu menyamai bahkan lebih tinggi daripada beton konvensional [28]. Jika dibandingkan dengan beton konvensional dengan menggunakan metode *ambient curing*, kuat tekan yang didapat pada beton geopolimer mampu lebih tinggi. Hal ini dikarenakan reaksi polimerisasi distimulasi oleh kandungan kalsium (Ca) yang terdapat pada material *precursor* [29].

Penggunaan HMNS (*High Magnesium Nickel Slag*) yang tidak tepat dapat menurunkan kuat tekan beton geopolimer [30]. Karakteristik beton dengan kombinasi GGBFS dan *ferronickel slag* dengan metode *ambient curing* mendapatkan hasil adalah menurunnya kuat tekan beton dengan penambahan persentase *ferronickel slag*.

Material GGBFS dan nano silica dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah beton geopolimer. Penggunaan material terak nikel, metakaolin, dan abu sekam padi juga dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah, namun penggunaan kadar yang berlebihan dapat menurunkan kekuatannya [31].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Hermana Kaselle dan Raynaldo Bunga Allo (2021) [32] dihasilkan kesimpulan dari hasil pengujian bahwa beton yang menggunakan *slag* nikel sebagai agregat halus mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 21,157%. Nilai kuat tekan yang diperoleh pada umur 7 hari menunjukkan nilai kuat tekan yang cukup besar di usia beton awal, hal ini menunjukkan penggunaan *slag* nikel pada beton akan memberikan kekuatan awal yang tinggi pada beton geopolimer.

Nilai kuat lentur rata-rata beton polimer yang menggunakan *slag* nikel sebagai agregat halus bahan campuran beton sebesar 3,928 MPa, sedangkan kuat lentur beton polimer yang menggunakan pasir sebagai agregat halus sebesar 3,324 MPa. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan *slag* nikel akan memberikan peningkatan kapasitas lentur balok sebesar 18,182%.

C. Evektivitas Beton Geopolimer dalam Imobilisasi *Slag* Nikel

Terak nikel (*Nickel Slag*) adalah jenis residu industri yang dibuang. Pirometalurgi adalah metode umum peleburan nikel – besi, Proses ini biasanya menghasilkan 6-16 ton terak limbah per 1 ton paduan nikel – besi yang diproduksi [33].

Geopolimer terutama yang berasal dari mineral alami yang mengandung aluminosilikat aktif atau limbah padat industri [34]. Sebagian besar Si-O dan ikatan Al-O dalam bahan baku dapat diputus dan disusun kembali pada suhu kamar, sehingga prosesnya memiliki konsumsi energi yang rendah [35]. Penggunaan limbah industri untuk menyiapkan geopolimer juga memberikan pendekatan yang dapat diandalkan untuk mengurangi konsumsi beban limbah padat industri terhadap lingkungan. Banyak peneliti juga telah menyatakan bahwa geopolimer dapat secara efektif mengimobilisasi ion logam berat.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Jinyuan Fan, et al., (2023) dalam jurnal "*Journal of Hazardous Material*" yang berjudul *Heavy Metals Immobilization Of Ternary Geopolymer Based On Nickel Slag, Lithium Slag And Metakaolin* didapatkan hasil bahwa karakteristik pelarutan logam berat merupakan indikator utama dari efek imobilisasi pada bahan semen. semakin rendah konsentrasi pelarutan ion logam berat, semakin stabil logam berat tersebut berada di dalamnya [36]. Meskipun kandungan Cr dalam bahan baku melebihi Pb dan Cu lebih dari 250 kali, konsentrasi pelarutan Cr tidak berbeda secara signifikan dari Pb dan Cu karena Cr memiliki prioritas imobilisasi yang lebih tinggi daripada Cu dan Pb [37].

Karena nilai pH larutan hasil pelindian menurun, konsentrasi pelindian Pb, Cu, dan Cr meningkat, dan tingkat imobilisasi menurun. Alasannya adalah lingkungan asam merusak struktur internal dari senyawa terner tersebut. Geopolimer yang menyebabkan peningkatan migrasi ion logam berat ke dalam lindi. Dalam kondisi asam, logam berat mudah berubah dari keadaan terikat hidroksil yang relatif stabil ke keadaan disosiatif, dan ini ion logam berat disosiatif sangat metastabil [38]. Analisis komprehensif dari hal di atas, geopolimer dengan komponen berbasis NS (*Nickel* Slag)-LS (Litium *Slag*)-MK (Meta Kaolin) bahwa logam berat yang terkandung di dalam geopolimer tidak akan mengancam lingkungan, dan material semen memiliki efek imobilisasi yang unggul terhadap logam berat bawaan. Logam berat diimobilisasi oleh material semen yang diaktifkan alkali melalui beberapa cara yaitu, ikatan kimia, enkapsulasi fisik, adsorpsi, dan substitusi untuk Al_{3+} [39].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi literatur yang dilakuka dapat disumpulkan bahwa:

1. Metode pirometalurgi *Rotary Kiln-Electric Furnace* (RKEF) terbukti efektif dalam mengekstraksi nikel dari bijih laterit tipe saprolit berkadar nikel di atas 1,5%. Efektivitas ini ditunjukkan oleh keberhasilan reduksi nikel dari mineral silikat menjadi fase logam feronikel dengan *recovery* yang tinggi, serta terbentuknya *slag* nikel sebagai residu dengan kandungan nikel sisa yang relatif rendah. Komposisi *slag* yang didominasi oksida silika dan alumina menjadi indikator bahwa sebagian besar nikel telah berhasil dipisahkan, sehingga proses RKEF tidak hanya efisien dalam pengambilan nikel, tetapi juga menghasilkan residu yang berpotensi dimanfaatkan lebih lanjut dalam mendukung hilirisasi nikel.
2. Konsentrasi residu nikel yang tersisa pasca-ekstraksi berpengaruh signifikan terhadap proses polimerisasi dan kinerja mekanis beton geopolimer. Residu nikel dalam bentuk *slag* berperan sebagai sumber tambahan silika dan alumina yang dapat mendukung reaksi geopolimerisasi apabila digunakan pada komposisi yang optimum. Pada kadar yang terkendali, keberadaan *slag* nikel mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer, serta memberikan kekuatan awal yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa residu nikel dapat berkontribusi positif terhadap

pembentukan matriks polimer anorganik yang padat dan stabil. Namun demikian, penggunaan residu nikel dengan konsentrasi yang berlebihan, khususnya *slag* nikel berkadar magnesium tinggi (*High Magnesium Nickel Slag*/HMNS), cenderung menghambat reaksi polimerisasi dan menurunkan kekuatan mekanis material. Kandungan magnesium yang tinggi dapat mengganggu pembentukan jaringan aluminosilikat yang optimal, sehingga menghasilkan struktur matriks yang kurang kompak. Oleh karena itu, konsentrasi residu nikel pasca-ekstraksi harus dikontrol secara cermat agar dapat memaksimalkan kinerja mekanis beton geopolimer. Dengan pengaturan komposisi yang tepat, residu slag nikel tidak hanya berfungsi sebagai bahan substitusi, tetapi juga berperan dalam menghasilkan material geopolimer berkinerja tinggi dan berkelanjutan.

3. **struktur matriks geopolimer berbasis slag nikel (NS)** yang diaktifkan secara alkali **sangat efektif dalam mengimobilisasi sisa senyawa nikel dan logam berat bawaan** sehingga mencegah terjadinya pelindian ke lingkungan. Efektivitas imobilisasi ini ditunjukkan oleh **rendahnya konsentrasi logam berat dalam lindi**, yang berada di bawah ambang batas standar lingkungan dan material konstruksi. Mekanisme imobilisasi terjadi melalui kombinasi **enkapsulasi fisik dalam matriks geopolimer yang padat, ikatan kimia antara ion logam dan jaringan aluminosilikat (Si-O-Al),** serta **adsorpsi dan substitusi ion logam terhadap posisi Al^{3+} dalam struktur geopolimer.** Meskipun kondisi asam dapat menurunkan stabilitas matriks dan meningkatkan mobilitas logam berat, pada kondisi lingkungan normal material geopolimer berbasis NS–LS–MK menunjukkan **stabilitas struktural dan kemampuan imobilisasi yang unggul**. Dengan demikian, transformasi slag nikel menjadi produk geopolimer tidak hanya meningkatkan nilai tambah limbah industri, tetapi juga **memenuhi kriteria keamanan lingkungan** untuk diaplikasikan sebagai material konstruksi yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada peneliti – peneliti terdahulu yang karyanya teLah dijadikan acuan bagi penulis dalam menulis karya ilmiah ini. Penulis juga ucapkan terimakasih kepada pihak – pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

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

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

[3] Fan, Q., Yuan, S., Wen, J., & He, J. (2024). Review on comprehensive utilization of nickel laterite ore. *Minerals Engineering, 218*, 109044.

[4] Peng, Z. (2011). The Latest and Future Development of Laterite Nickel Ore Processing Technology. *In Rare Metals and Cemented Carbides*.

[5] Nurjaman, I. (2021). OPTIMASI PROSES RKEF UNTUK PRODUKSI FERONIKEL DARI BIJIH NIKEL LATERIT INDONESIA. *Metalurgi, 37*(2), 67-68.

[6] Li, H., et al. (2022). ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS OF NICKEL SMELTING PROCESSES. *Metallurgical Review, 8*, 1234-1245.

[7] Rizky, M. A., Sukamto, 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.

[8] Q, W., Y, W., W, T., & H, M. (2018). Utilization of nickel slag as raw material in the production of portland cement for road construction. *Constr. Build. Mater, 193*, 426-434.

[9] Kaselle, H., & Allo, R. B. (2021). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering, 1*(2), 67-73.

[10] Katsitosis, N. S., Tsakiridis, P. E., Velissarou, D., Katsitosis, M. S., Alhassan, S. M., & Beazi. (2015). Utilization of Ferronickel Slag as Additive in Portland Cement: A Hydration Leaching Study. *Journal Waste and Biomass Valorization, 6*(2), 177-189.

[11] Kaselle, H., & Allo, R. B. (2021). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering, 1*(2), 67-73.

[12] Kaselle, H., & Allo, R. B. (2021). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering, 1*(2), 67-73.

[13] Kaselle, H., & Allo, R. B. (2021). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering, 1*(2), 67-73.

[14] Khairi, I. J., Nelfia, L. O., Yuwono, B. E., & Siregar, P. H. (2020). REVIEW KARAKTERISTIK MEKANIK DAN TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE BETON GEOPOLIMER. *Jurnal Infrastruktur, 6*(2), 105-114.

[15] Ahmad, S. B., & Sultan , R. (2020). STUDI KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH-SLAG DENGAN RASIO AKTIVATOR Na2SiO3 DAN NaOH BERBEDA. *Prosiding 4th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2020*, 7-12.

[16] Habshi, F. (2022). RECENT ADVANCES IN BIOLEACHING OF SULFIDE ORES. *Applied Microbiology and Biotechnology, 106*, 2134-2145.

[17] Keskinkilic, E. (2019). Nickel Laterite Smelting Processes and Some Examples of Recent Possible Modifications to the Conventional Route. . *Metals, 9*(9), 974.

[18] Jiang-min, P., Pei-min, G., & Pei, Z. (n.d.). Analysis on Pyrometallurgy Technologies of Laterite-Nickel Ore. *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH*.

[20] Wang, L., et al. (2018). Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion in a Rotary Klin for Ferronickel Production. *Applied Thermal Engineering, 138, 542-553*.

[21] Dimitrova, S., & Mehandzhiev, R. (2015). Characterization of ferronickel slag from electric arc furnace. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 45*(3), 317-326.

[22] Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2020). Potensi Slag Nikel sebagai Bahan Baku Industri. *Kemenperin Press Release*. Jakarta.

[23] Komnitsas, A., & Zaharaki, D. (2014). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering, 20*(14), 1261-1277.

[24] Zhang, L., & al, e. (2018). Effect of nickel slag powder on the performance of concrete. *Construction and Building Materials, 164*, 663-673.

[25] PT Aneka Tambang Tbk. (2020). *PT Aneka Tambang Tbk Laporan Keberlanjutan 2020 Suatainability Report*. Bogor: PT. Aneka Tambang Tbk.

[26] Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production, 223*, 704-728.

[27] Hardjito, D., Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Faculty of Engineering Curtin University of Technology*.

[28] Farhan, N. A., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. (2019). Investigation Of Engineering Properties of Normal and High Strength Fly Ash Based Geopolymer and Alali-Activated Slag Concrete Compared to Ordinary Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materails, 196*, 26-42.

[29] Nath, P., Sarker, P. K., & Rangan, V. B. (2015). Early Age Properties of Low-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete Suitable for Ambient Curing. *Procedia Engineering, 66*, 601-607.

[30] Yang, T., Yao, X., & Zhang, Z. (2014). Geopolymer Prepared With High-Magnesium Nickel Slag: Caracterizatiob of properties and Microstructure. *Construction and Building Materials, 59*, 188-194.

[31] Khairi, I. J., Nelfia, L. O., Yuwono, B. E., & Siregar, P. H. (2020). REVIEW KARAKTERISTIK MEKANIK DAN TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE BETON GEOPOLIMER. *Jurnal Infrastruktur, 6*(2), 105-114.

[32] Kaselle, H., & Allo, R. B. (2021). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering, 1*(2), 67-73.

[33] Shen, Y., Chong, J., Huang, Z., Tian, J., Zhang, W., Tang, X., . . . Du, X. (2019). Thermodynamics and kinetics of FeO transferred to Fe3O4 in modified nickel slag during molten oxidation process. *Materials Research Express*.

[34] Qaidi, S. M., Tayeh, B. A., Ahmed, H. U., & Emad, W. (2022). A review of the sustainable utilisation of red mud and fly ash for the production of geopolymer composites. *Construction and Building Materials, 350*.

[35] Abbas, A. G., Aziz, F. N., Abdan, K., Nasir, N. A., & Huseien, G. F. (2022). A state-of-the-art review on fibre-reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials, 330*.

[36] Fan, J., Yan, J., Zhou, M., Xu, Y., Lu, Y., Duan, P., . . . Zhang, Z. (2023). Heavy metals immobilization of ternary geopolymer based on nickel slag, lithium slag and metakaolin. *Journal of Hazardous Materials, 453*, 1-36.

[37] Liu, J., Luo, W., Cao, H., Weng, L., Feng, G., X, . . . Luo. (2020). Understanding the immobilization mechanisms of hazardous heavy metal ions in the cage of sodalite at molecular level: A DFT study. *Microporous and Mesoporous Materials, 306*.

[38] Huang, Z., Jiang, L., Wu, P., Dang, Z., Zhu, N., Liu, Z., & Luo , H. (2020). Leaching characteristics of heavy metals in tailings and their simultaneous immobilization with triethylenetetramine functioned montmorillonite (TETA-Mt) against simulated acid rain. *Environmental Pollution, 266*.

[39] Ji, Z., & Pei, Y. (2019). Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: A review. *Journal of Environmental Management*, *231*, 256-267.