

Evaluasi Kinerja Beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) Mutu Tinggi dengan Substitusi Slag Nikel sebagai Agregat Halus

Fitriyanti*, Ismawati, Humairah Annisa

Fakultas Teknik Sipil, Universitas Lamappapoleonro, Soppeng, Sulawesi Selatan

*fitrisubhan0778@gmail.com

Diajukan: 21 Oktober 2025, Revisi: 25 Oktober 2025, Diterima: 30 Oktober 2025

Abstract

The growing global demand for infrastructure requires innovative and sustainable construction materials. One such innovation is Self-Compacting Concrete (SCC), a high-performance concrete capable of flowing and compacting without vibration. This study examines the use of nickel slag—an industrial by-product from ferronickel smelting—as a replacement for fine aggregate in high-strength SCC. Nickel slag has physical properties similar to natural sand and contains high levels of silica (SiO₂) and magnesium oxide (MgO), making it suitable for enhancing mechanical performance such as compressive and flexural strength at optimal substitution levels. The objectives of this research are to determine the optimum mix composition of SCC using nickel slag, evaluate its mechanical properties and corrosion resistance, and identify the relationship between mechanical behavior and durability in aggressive environments. Results show that nickel slag with No. 1 gradation can serve as a key component in sustainable construction. At optimal replacement levels, it significantly increases compressive strength, enabling the production of high-performance SCC. Additionally, SCC with nickel slag demonstrates excellent flowability and self-compacting capability, improving construction efficiency. Utilizing this industrial waste contributes to solid waste reduction, conservation of natural resources, promotion of circular economy principles, and improved concrete durability against corrosion.

Keywords: Industrial Waste, Nickel Slag, High-Strength Concrete, SCC Concrete (Self-Compacting Concrete)

Abstrak

Peningkatan kebutuhan infrastruktur global menuntut inovasi material konstruksi yang berkelanjutan. Salah satu material inovatif tersebut adalah *Self-Compacting Concrete* (SCC), yaitu beton yang mampu mengalir dan memadat tanpa vibrasi. Penelitian ini mengevaluasi karakteristik slag nikel, limbah industri peleburan feronikel, sebagai pengganti agregat halus pada beton SCC mutu tinggi. Slag nikel memiliki sifat fisik mirip pasir serta komposisi kimia yang didominasi SiO₂ dan MgO, sehingga berpotensi meningkatkan performa beton. Tujuan penelitian meliputi penentuan komposisi optimum beton SCC berbahan slag nikel, evaluasi sifat mekanik dan ketahanan korosi, serta identifikasi hubungan antara keduanya pada lingkungan agresif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa slag nikel bergradasi No. 1 dan memberikan peningkatan signifikan terhadap kuat tekan pada kadar substitusi optimum, hingga memenuhi kategori beton kinerja tinggi. Beton SCC berbahan slag nikel juga menunjukkan kemampuan mengalir dan mencetak secara mandiri (*high fluidity*), sehingga meningkatkan efisiensi pekerjaan. Selain meningkatkan performa mekanik dan durability, pemanfaatan slag nikel mendukung konstruksi berkelanjutan melalui pengurangan limbah industri, konservasi sumber daya alam, dan kontribusi terhadap ekonomi sirkular.

Kata Kunci: Limbah Industri, Slag Nikel, Beton Mutu Tinggi, Beton SCC.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan infrastruktur mendorong penggunaan material konstruksi yang tidak hanya memiliki kinerja mekanik tinggi, tetapi juga efisien dalam pelaksanaan dan berkelanjutan secara lingkungan. Beton konvensional dengan metode pemadatan mekanis sering menghadapi kendala pada elemen berdimensi rapat tulangan, sehingga berpotensi menimbulkan honeycombing dan penurunan kualitas beton. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, Self-Compacting Concrete (SCC) dikembangkan sebagai beton yang mampu mengalir, mengisi cetakan, dan memadat secara mandiri tanpa memerlukan proses pemadatan tambahan (Amiruddin et al., 2022).

Pengembangan SCC mutu tinggi menuntut penggunaan material penyusun dengan karakteristik fisik dan mekanik yang sesuai, khususnya pada agregat halus yang berperan penting dalam menjaga stabilitas, viskositas, dan kemampuan alir beton. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa variasi jenis dan gradasi pasir lokal berpengaruh signifikan terhadap sifat segar SCC, termasuk slump flow dan passing ability (Amiruddin et al., 2022). Oleh karena itu, pencarian alternatif agregat halus yang memiliki kualitas setara atau lebih baik dari pasir alam menjadi isu penting dalam pengembangan SCC.

Di sisi lain, industri pertambangan nikel menghasilkan limbah padat berupa slag nikel dalam jumlah besar, yang hingga saat ini pemanfaatannya masih terbatas dan berpotensi menimbulkan dampak lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik (Ressa et al., 2024; Tanjung et al., 2022). Beberapa penelitian terdahulu melaporkan bahwa slag nikel memiliki sifat fisik yang menyerupai agregat alami serta kandungan silika yang relatif tinggi, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material konstruksi (Iwardoyo, 2016; Singh et al., 2022). Pemanfaatan slag sebagai material beton juga sejalan dengan konsep konstruksi berkelanjutan melalui pengurangan eksploitasi sumber daya alam dan peningkatan pemanfaatan limbah industri.

Penelitian terkait penggunaan slag nikel dalam beton telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Penggunaan slag nikel sebagai agregat, baik kasar maupun halus, dilaporkan mampu meningkatkan kuat tekan beton pada kadar substitusi tertentu (Lian et al., 2021; Yanuarini et al., 2022). Selain itu, beton yang menggunakan slag nikel juga menunjukkan performa yang baik pada lingkungan agresif, khususnya terkait ketahanan terhadap korosi tulangan dan paparan lingkungan laut (Ahmad et al., 2022). Studi oleh Jumari et al. (2006) dan Anjani dan Walujodjati (2022) menegaskan bahwa sifat beton dan kondisi lingkungan sangat memengaruhi laju korosi tulangan, sehingga pemilihan material beton menjadi faktor kunci dalam peningkatan durabilitas struktur.

Dengan adanya pemanfaatan penambahan slag nikel pada beton Self Compacting Concrete (SCC) terhadap kekuatan tekan dan flowability. Dimana Penambahan slag besi, yang mengandung CaO, SiO₂, dan MgO, meningkatkan flowability dan kekuatan tekan beton, terutama setelah 14 hari karena sifat pozzolanik slag besi yang bereaksi secara penuh (Apriyanki Wahono et al., 2015). Penggunaan bahan limbah seperti slag nikel dalam beton SCC tidak hanya dapat meningkatkan kinerja beton tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi limbah industry.

Tantangan utama dalam penggunaan beton SCC (*Self-Compacting Concrete*) terletak pada komposisi materialnya yang harus dioptimalkan untuk memastikan performa mekanis dan ketahanan lingkungan yang optimal. Untuk mencapai aliran yang baik tanpa pemadatan eksternal, SCC membutuhkan proporsi bahan tambahan seperti superplasticizer dan fines (butiran halus) yang tepat, yang sering kali sulit dicapai tanpa mengorbankan kekuatan atau durabilitas. Selain itu, pengaturan campuran yang salah dapat menyebabkan masalah seperti segregasi atau perbedaan kualitas pada permukaan beton. Oleh karena itu, inovasi dalam pengembangan bahan pengikat, substitusi material, serta aditif yang ramah lingkungan menjadi sangat penting untuk memastikan SCC tetap memiliki kekuatan

struktural yang tinggi, ketahanan terhadap faktor lingkungan seperti serangan kimia atau korosi, serta efisiensi produksi yang berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut tentang komposisi material ini diperlukan supaya beton SCC dapat diterapkan secara luas dengan kinerja yang stabil dan ramah lingkungan. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik Slag Nikel yang dapat dipergunakan sebagai bahan pengganti atau bahan tambah pada pembuatan Beton SCC.

Meskipun sering dikategorikan sebagai limbah, slag nikel memiliki potensi pemanfaatan yang signifikan sebagai material konstruksi, khususnya pada beton berkinerja tinggi. Namun, volumenya yang besar dan kandungan elemen tertentu menuntut pengelolaan yang tepat agar tidak menimbulkan dampak lingkungan, seperti pencemaran lahan dan penurunan kualitas air. Oleh karena itu, pemanfaatan slag nikel sebagai bahan bangunan tidak hanya berpotensi mengurangi beban lingkungan industri pertambangan, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan. Studi terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan material alternatif dalam konstruksi dapat memberikan manfaat teknis sekaligus meningkatkan kelayakan ekonomi proyek (Nelfia et al., 2024).

Dalam beton, agregat halus berperan penting dalam membentuk mortar yang mengikat agregat kasar, sehingga sangat memengaruhi workability dan kinerja beton secara keseluruhan. Agregat halus umumnya berupa pasir alam hasil desintegrasi batuan dengan ukuran maksimum 5,0 mm, bertekstur relatif kasar dan berbentuk membulat. Karakteristik agregat halus tersebut menentukan kemampuan alir dan kohesi campuran beton, terutama pada beton Self-Compacting Concrete (SCC) yang menuntut stabilitas dan kemampuan mengalir tinggi (Romadhon et al., 2023).

Penelitian terdahulu hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat kasar untuk beton 20 MPa, dan tidak dapat mencapai kuat tekan rata-rata yang direncanakan yaitu 20 MPa ditambah margin 12 MPa, mengakibatkan penurunan kuat tekan dan tidak memberikan peningkatan mutu beton. Penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat kasar pada beton struktural dengan kuat tekan desain ≥ 20 MPa tidak direkomendasikan. (Amir, 2022; Sukman, 2022).

Syamsul Bahri, et al. (2022) menyimpulkan bahwa terjadinya peningkatan kekuatan mekanik dan potensi ketahanan beton perbandingan pada usia 28 hari dengan menggunakan kombinasi bahan slag nikel, fly ash, dan air-semen dengan komposisi tertentu. Rita Irmawaty, et al. (2023) menemukan bahwa beton yang mengandung 50% slag nikel serta penggantian 15% dan 30 % semen dengan slag nikel menunjukkan bahwa kepadatan beton meningkat karena adanya slag kombinasi pemakaian slag nikel dan fly ash.

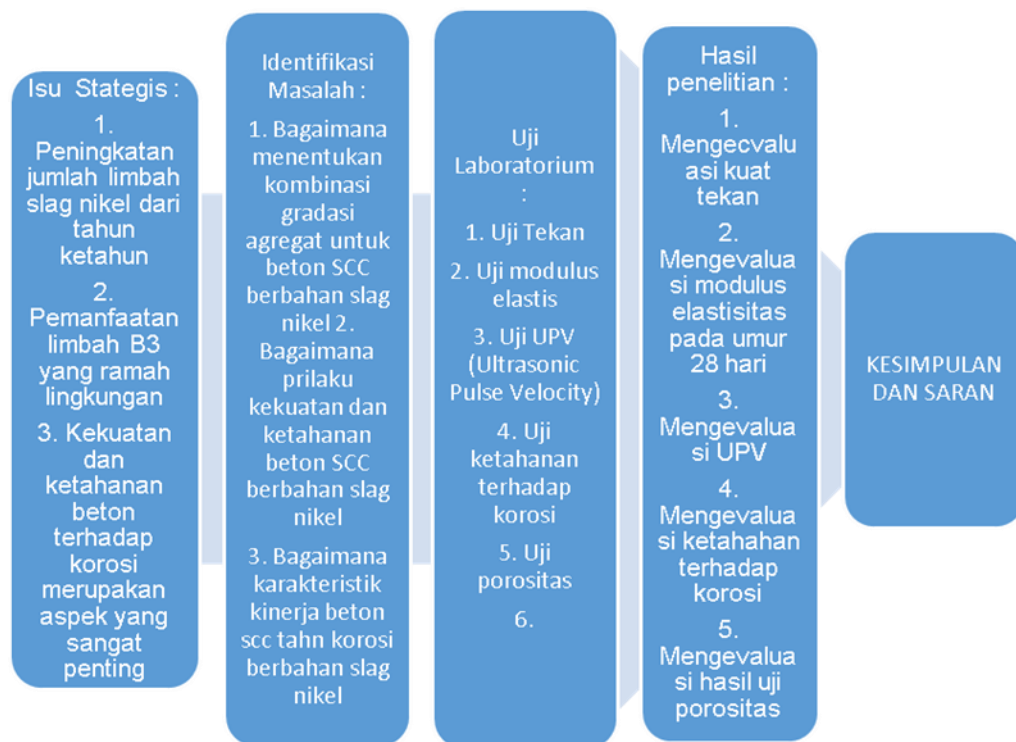
Meskipun demikian, kajian yang secara khusus mengevaluasi kinerja beton SCC mutu tinggi dengan substitusi slag nikel sebagai agregat halus masih terbatas, terutama yang mengaitkan antara sifat segar, kuat tekan, dan aspek ketahanan terhadap lingkungan agresif secara terpadu. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada beton konvensional atau penggunaan slag sebagai agregat kasar, sehingga diperlukan studi lebih lanjut untuk menilai kelayakan slag nikel sebagai agregat halus pada sistem SCC mutu tinggi. Slag Nikel adalah produk sampingan berbentuk batuan sisa dari proses peleburan bijih nikel, yang termasuk dalam kategori limbah padat industri.

Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan Beton SCC yang berbahan Slag Nikel yang tahan terhadap kekuatan beton mutu tinggi dan dengan pemakaian Slag Nikel Penganti pasir diharapkan dapat mengurangi limbah B3 dimana Slag Nikel termasuk limbah B3 yang mengurangi.

2. METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan diagnostik eksperimental dengan fokus di laboratorium, tepatnya di Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin.

Mendapatkan komposisi optimum penggunaan slag nikel paada beton mutu tinggi. Hipotesis pada penelitian ini adalah mengevaluasi penggunaan slag nikel pada bahan penyusun beton SCC yang tahan terhadap korosi. Dimana slag nikel dijadikan bahan material untuk mengetahui kekuatan dan ketahanan beton scc terhadap korosi. Berdasarkan penelitian terdahulu untuk bahan tambah slag nikel pada penyusun beton maka untuk menjawab pertanyaan utama yang disimpulkan pada penelitian tersebut. Limbah slag nikel yang dijadikan kombinasi sebagai agregat halus pengganti pasir dan kerikil yang akan dikomposisikan dengan material lainnya sehingga membentuk komposisi yang tepat yang dijadikan sebagai alternatif bahan subsidi pasir alami dan kerikil.



Gambar 1. Kerangka berpikir penelitian

Tahapan pengumpulan data:

1. Studi Pustaka, sebagai sumber untuk memperoleh data sekunder dan penambahan bahan bacaan untuk memperkaya wawasan tentang beton SCC dan karakteristik slag nikel yang dijadikan bahan substitusi untuk beton SCC.
2. Pembuatan sampel: slag nikel sebagai bahan pengganti agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil) sehingga mendapatkan komposisi yang tepat untuk material penyusun beton SCC dengan kuat tekan yang tinggi.
3. Pengujian dilab dengan membuat dan menguji sejumlah sampel sebagai data primer yang digunakan dalam menganalisis dan mengkaji hasil untuk mencapai tujuan penelitian.

Adapun tahapannya :

Tahap Persiapan Material

- Pengujian Karakteristik Material Awal: Melakukan pengujian standar terhadap seluruh material penyusun, meliputi:
 - Semen: Pengujian berat jenis.
 - Pasir Alam dan Agregat Kasar (Kerikil): Pengujian kadar air, berat jenis, penyerapan air, analisis saringan, dan kadar lumpur (sesuai SNI).
 - *Slag* Nikel (Pengganti Pasir): Pengujian karakteristik fisik (kadar air, berat jenis, penyerapan air, analisis saringan, dan kadar lumpur) untuk memastikan kelayakan sebagai agregat halus pengganti.
 - Air dan *Superplasticizer*: Pengujian kualitas air dan dosis bahan tambah (*admixture*).

Tahap Perancangan dan Pembuatan Campuran

- Perancangan Campuran (Mix Design): Merancang komposisi beton SCC acuan (kontrol, 0% *slag* nikel) dengan mutu rencana tertentu (misalnya $K = 350$ MPa), sesuai standar seperti EFNARC atau ACI, dengan mempertimbangkan persyaratan SCC (*flowability, passing ability*, dll.).
- Penentuan Variasi Substitusi: Menentukan persentase *slag* nikel yang akan menggantikan pasir alami secara parsial (misalnya 0%, 50%, 75%, 100%, dst.) atau bahkan penuh (100%).
- Pembuatan Campuran Uji: Mencampur bahan-bahan sesuai *mix design* dan variasi yang telah ditetapkan.
- Tahapan Pengujian Beton Segar (SCC)
- Tahapan Pembuatan dan Perawatan Beton
- Tahapan Pengujian Kuat Tekan Beton

Alat dan Bahan Penelitian :

1. Alat Penelitian : Saringan, Shaker Mechine, Timbangan Digital, Oven, Mesin Los Angelas, Gelas Ukur
2. Bahan Penelitian : *Slag* Nikel dari PT Huadi Nickel Alloy Indonesia (HNI)



Gambar 2. *Slag* Nikel PT. HNI Bantaeng Sulawesi Selatan

Langkah – Langkah pengujian saringan untuk agregat halus (*Slag* Nikel) :

1. Timbang Saringan
2. Tambahkan material yang akan disaring
3. Lakukan Penyaringan selama 10 – 15 menit
4. Timbang Kembali
5. Bersihkan saringan

Desain benda uji dalam penelitian ini adalah beton berbentuk kubus dengan ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm, untuk persiapan pengujian kuat tekan pada umur 7,21 dan 28 dimana masing-masing umur beton dibuatkan sampel uji sebanyak 3 sampel. Dan bentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm untuk pengujian porositas dan absorpsi masing – masing 3 sampel. Pembuatan beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan memanfaatkan pasir *slag* nikel sebagai pengganti sebagian atau seluruh agregat halus (pasir alami) merupakan inovasi penting dalam konstruksi berkelanjutan. Pasir *slag* nikel, sebagai limbah industri feronikel, memiliki sifat fisik yang mirip dengan pasir alami dan telah terbukti memiliki potensi untuk meningkatkan sifat mekanik beton, seperti kuat tekan dan kuat lentur, pada kadar substitusi tertentu. Penggunaan *slag* nikel dalam SCC sangat relevan karena karakteristiknya yang mudah mengalir (*high fluidity*) dan memadat sendiri (*self-compacting*) tanpa perlu vibrasi, sementara pemanfaatan limbah ini juga berkontribusi pada pengurangan eksploitasi pasir sungai dan masalah lingkungan akibat penimbunan limbah industri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Slag Nikel memiliki komposisi kimia yang bervariasi tergantung pada jenis bijih dan proses peleburan, namun umumnya didominasi oleh silika (SiO_2) dan magnesium oksida (MgO), yang dapat mencapai persentase signifikan, serta besi (Fe) dalam bentuk oksida. Selain itu, material ini juga mengandung sejumlah kecil oksida dari berbagai elemen lain seperti aluminium (Al_2O_3), kalsium (CaO), kromium (Cr), mangan (Mn), dan bahkan sisa nikel (Ni) yang tidak terekstraksi sepenuhnya, serta unsur-unsur jejak lainnya. Kandungan silika yang tinggi ini menjadikan nikel slag menarik untuk berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan pengganti agregat dalam konstruksi atau sebagai sumber silika, meskipun keberadaan logam berat tertentu dalam konsentrasi yang bervariasi memerlukan evaluasi ketat untuk memastikan keamanannya dalam pemanfaatan ulang.

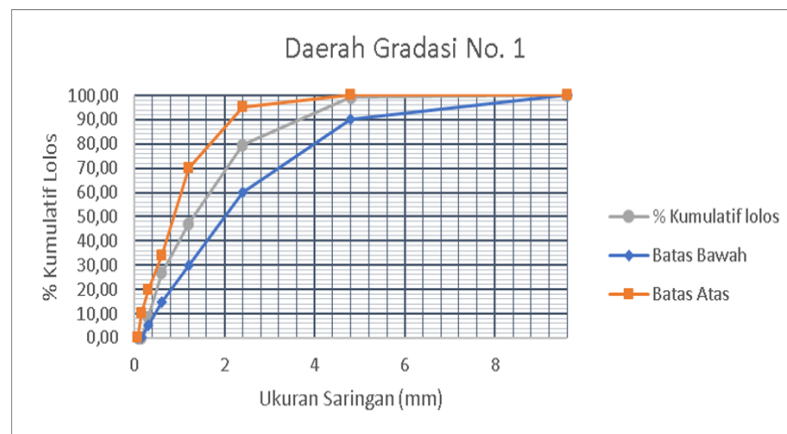


Gambar 3. Nilai Slump Test untuk Beton SCC



Gambar 4. Pembuatan Benda Uji Sampel Beton SCC Mutu K 350

Dari hasil penelitian tentang slag nikel yang dijadikan bahan ganti (agregat halus) atau bahan tambah pada pembuatan beton mutu tinggi adalah sebagai berikut:



Gambar 5 Grafik Gradasi Slag Nikel

Penggunaan slag nikel dalam beton SCC dapat meningkatkan kinerja mekanisnya. Hal ini berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan durabilitas beton, membuatnya lebih tahan terhadap tekanan dan kondisi lingkungan yang keras, seperti korosi. Selain itu, karena kemampuan slag nikel yang mirip dengan pasir, beton SCC berbahan dasar material ini memiliki kemampuan untuk mengalir dan mengisi cetakan dengan mudah tanpa memerlukan pemadatan mekanis. agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil) dalam pembuatan beton. Material ini memiliki komposisi dan sifat fisik yang mirip dengan pasir, menjadikannya bahan yang sangat memungkinkan untuk digunakan sebagai bahan konstruksi. Pemanfaatan slag nikel, terutama dalam pembuatan beton mutu tinggi. Dan juga menunjukkan potensi besar sebagai material konstruksi berkelanjutan yang unggul. Secara mekanik, substitusi *slag* nikel pada persentase optimal terbukti meningkatkan kuat tekan beton SCC secara signifikan, bahkan memungkinkan pencapaian klasifikasi beton kinerja tinggi dengan hasil yang melampaui beton referensi, sambil tetap mempertahankan karakteristik penting SCC yaitu fluiditas tinggi (*high fluidity*) dan kemampuan memadat sendiri (*self-compacting*) tanpa vibrasi. Selain itu, pemanfaatan limbah industri ini memberikan manfaat lingkungan yang penting dengan mengurangi ketergantungan pada

penambangan pasir alami dan mengatasi masalah penimbunan *slag* nikel, mengukuhkan posisinya sebagai material alternatif yang efektif dan ramah lingkungan.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini slag nikel yang digunakan berada pada gradasi No. 1, slag nikel yang dijadikan benda uji adalah slag nikel yang berasal dari PT. HNI Bantaeng Sulawesi Selatan. Pemanfaatan limbah industri ini tidak hanya membantu mengurangi limbah padat, tetapi juga melestarikan sumber daya alam dan mengurangi dampak ekologis dari penambangan pasir. Dengan demikian, slag nikel berpotensi menjadi komponen kunci dalam mendorong praktik konstruksi berkelanjutan dan ekonomi sirkular, mengubah limbah menjadi sumber daya yang berharga yang dapat diubah menjadi salah satu bahan pengganti untuk material yang dipergunakan pada bahan pencampur beton. Slag nikel mempunyai komposisi dan sifat fisik dengan material pasir. Sehingga sangat memungkinkan untuk pemakaian sebagai bahan material. Komposisi optimum beton SCC slag nikel adalah formulasi campuran (semen, air, agregat kasar, slag nikel pengganti pasir, dan *superplasticizer*) yang menghasilkan kinerja beton segar terbaik sambil tetap mencapai kuat tekan rencana tertinggi. Evaluasi ini bertujuan untuk membuktikan bahwa substitusi pasir alami dengan limbah slag nikel tidak hanya mempertahankan atau meningkatkan kekuatan beton, tetapi juga meningkatkan daya tahannya (*durability*) terhadap lingkungan agresif, khususnya korosi. Secara umum, semakin tinggi mutu beton (kuat tekan), semakin padat struktur internalnya (porositas rendah), yang pada gilirannya akan mengurangi permeabilitasnya.

Peningkatan Kinerja Mekanis Beton: Beton SCC (*Self-Compacting Concrete*) yang mengandung slag nikel dapat meningkatkan kinerja mekanisnya. Hal ini berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan durabilitas beton, sehingga beton SCC berbahan slag nikel lebih tahan terhadap tekanan dan kondisi lingkungan yang keras. Efisiensi konstruksi yang lebih tinggi dimana beton SCC berbahan slag nikel memiliki kemampuan untuk mengalir dan mengisi cetakan dengan mudah tanpa memerlukan pemadatan mekanis. Hal ini mengurangi waktu dan tenaga kerja yang diperlukan selama proses pengecoran, sehingga meningkatkan efisiensi konstruksi. Dengan kemudahan dalam pengisian cetakan, beton ini sangat cocok untuk proyek-proyek dengan desain arsitektural kompleks dan ruang yang sulit dijangkau, seperti struktur precast dan beton bertulang dengan detail halus. Slag nikel sebagai bahan material dalam pembuatan beton menawarkan solusi yang menjanjikan dan berkelanjutan. Material ini, yang merupakan produk sampingan dari peleburan bijih nikel, memiliki komposisi dan sifat fisik yang mirip dengan pasir alami. Penggunaannya dapat meningkatkan kinerja mekanis beton, termasuk kekuatan dan daya tahannya terhadap korosi dan kondisi lingkungan yang keras. Selain itu, dengan memanfaatkan slag nikel, volume limbah padat industri dapat dikurangi, melestarikan sumber daya alam, dan mempromosikan ekonomi sirkular dan konstruksi berkelanjutan. Slag nikel berpotensi menjadi komponen kunci dalam mengubah limbah menjadi sumber daya yang bernilai tinggi dalam industri konstruksi. Didunia ini terkhusus di negara kita Indonesia limbah industri belum maksimal dipergunakan karena ada beberapa hal yang menjadi kendala, diantaranya pihak industri yang menghasilkan slag nikel masih belum bisa mencari atau memecahkan akan dibuat dan diproduksi menjadi apa limbah tersebut, padahal penelitian tentang slag nikel sudah banyak dilakukan tetapi masih jarang yang memproduksi hasil limbah tersebut. Diharapkan dengan penelitian ini akan memberikan salah satu cara untuk mengurangi limbah industri tersebut dalam hal ini slag nikel. Sebagai pengganti pasir, slag nikel ditemukan memiliki karakteristik agregat yang umumnya memenuhi standar, seperti kadar air dan kadar lumpur yang sesuai, namun dapat menghasilkan beton dengan berat isi yang lebih tinggi daripada beton normal. Meskipun beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan slag nikel dapat memengaruhi sifat mekanik seperti meningkatkan kuat tekan

dan modulus elastisitas pada variasi tertentu, beberapa penelitian lain juga mencatat adanya penurunan pada kuat tarik belah. Secara keseluruhan, pemanfaatan *slag* nikel ini menjadi alternatif yang menarik untuk konstruksi berkelanjutan sekaligus mengatasi permasalahan limbah industri.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S. B., Irmawaty, R., Aly, S. H., & Amiruddin, A. (2022). Performance of fly ash concrete with nickel slag fine aggregate in the marine environment. *Journal*, 8(12), 3803–3814.
- Amir, A. (2022). Use of nickel slag waste as coarse aggregate in concrete. *Journal*, 7(2), 61–68.
- Amiruddin, Indrayani, Sukarman, Marpen, R., Permata, I., & Marlina. (2022). The making of self-compacting concrete (SCC) with variations of local sand. *Journal*, 10(2), 91–98.
- Anjani, W. S., & Walujodjati, E. (2022). Pengaruh Korosi Tulangan Terhadap Panjang Penyaluran pada Beton. *Jurnal Konstruksi*, 20(2), 311–320. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.20-2.1214>
- Arifin, M. Z., & Kustono, D. (2020). Characteristics of ASTM A36 steel plate corrosion rate due to bending treatment with angle, corrosion media, and corrosion time variations. *Journal*, 1(1), 21–29.
- Astuti, P., et al. (2022). IKLU study. *Journal*, 8(2), 197–205.
- Awainah, N., Sulfiana, Nurhaedah, Jamaluddin, & Aminullah, A. (2024). The role of infrastructure in driving economic growth and improving the quality of life. *Journal of Education and Teaching Review*, 7(3), 6847–6854.
- Irmawaty, R., Akbar, M., Tjaronge, C. M. W., Asad, M., & Ahmad, S. B. (2023). Compressive strength and corrosion behavior of steel bars embedded in concrete produced with ferronickel slag aggregate and fly ash: An experimental study. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8, Article 11621. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01162-1>
- Iwardoyo, J. (2016). Study of steel slag utilization as sabodam building material. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7(2), 131–146.
- Jumari, A., Purwanto, A., & Ardiansyah, A. (2006). Study of corrosion rate of concrete reinforcing steel using modified Matsuoka model. *Journal*, 5(1), 20–27.
- Lian, Y., et al. (2021). Mechanical properties of high-strength concrete with a combination of nickel slag and steel slag. *Journal*, 3(1), 55–62.
- Majalis, A. N., Permatasari, N. V., Novitasari, Y., Wicaksono, N., Armin, D., & Pratiwi, R. (2020). Kajian Awal Produksi Fero Sulfat dari Slag Nikel Melalui Proses Pelindian Menggunakan Asam Sulfat. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(1), 31–38. <https://doi.org/10.14710/jil.18.1.31-38>
- Marshus, M., Ibrahim, H., Karim, R., & Nide, J. (2019). Controlling the impact of factory waste (slag) in the processing of nickel ore into nickel pig iron (NPI). *General Mining Journal*, 2(1), 34–38.

- Ressa, Y., Mangesa, A. T., Pratama, K., & Redanto, A. (2024). Case study of B3 waste (nickel slag) management in the nickel mining industry in Indonesia. *Proceedings*, 3, 3–8.
- Romadhon, M. I., & Romadhon, E. S. (2023). ANALISIS BETON SELF COMPACTED MENGGUNAKAN SEMEN PCC. *JURNAL TEKNIK SIPIL-ARSITEKTUR*, 22(1), 103-112. <https://doi.org/10.54564/jtsa.v22i1.193>
- Singh, N., Singh, A., Ankur, N., Kumar, P., & Kumar, M. (2022). Reviewing the properties of recycled concrete aggregates and iron slag in concrete. *Construction Materials Journal*, 60(August).
- Sukman, S., Amir, A. A., Mahmud, M., & Hasrudin, H. (2022). Evaluasi saluran drainase di Lingkungan Desa Tumbudadio Kecamatan Tirawuta Kabupaten Kolaka Timur. *JURNAL UNITEK*, 15(2), 220–228. <https://doi.org/10.52072/unitek.v15i2.450>
- Sutandi, A., & Wilwin. (2021). Study of risk identification in infrastructure projects in Indonesia. *JMTS: Journal of Civil Engineering Partners*, 4(1), 295–302.
- Tanjung, A., Gonzales, R., Seprianti, A., & Izati, R. (2022). Analysis of nickel slag waste utilization as shotcrete raw material and handling of nickel slurry to reduce the environmental impact. *Journal*, 6(2), 11–22.
- Tampubolon, M., Gultom, R. G., Siagian, L., Lumbangaol, P., & Manurung, C. (2020). Corrosion rate of medium carbon steel due to dipping process in sulfuric acid (H_2SO_4) and hydrochloric acid (HCl) solutions with varying time. *Sprocket Journal of Mechanical Engineering*, 2(1), 13–21. <https://doi.org/10.36655/sproket.v2i1.294>
- Yanuarini, E., et al. (2022). The effect of nickel slag and fly ash substitution on concrete compressive strength as a wave breaker. *Journal*, 9(1), 1–8.