

Laju Korosi Tulangan Pada Beton SCC Berbahan Slag Nikel

Fitriyanti^{1*}, Rita Irmawaty¹, Fakhruddin¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar, INDONESIA

*Corresponding author: fitrisubhan0778@gmail.com

INTISARI

Material slag nikel merupakan produk sampingan massif dari peleburan biji nikel yang apabila tidak diolah maka akan mencemari lingkungan (limbah B3). Slag nikel ini biasa diolah menjadi bahan material yang bisa bermanfaat misalnya untuk material substitusi atau pengganti pasir dari bahan penyusun beton SCC. Integrasi slag nikel sebagai substitusi agregat halus terbukti meningkatkan performa mekanis dan durabilitas beton, melalui perbaikan densitas mikrostruktur serta penguatan *Interfacial Transition Zone (ITZ)*. Sifat pozzolanik dari slag nikel berperan aktif menutup pori-pori kapiler, sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih padat, homogen, serta memiliki porositas dan daya serap air yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Dalam aspek ketahanan terhadap degradasi, beton dengan substitusi slag nikel 50% menunjukkan performa superior dalam menahan laju korosi pada tulangan baja. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata lebar retak maksimum pada sampel dengan slag nikel (0,12 mm) lebih kecil dibandingkan beton normal (0,14 mm). Kondisi ini secara signifikan meminimalisasi alur penetrasi air dan ion klorida, sehingga mengurangi risiko penurunan kapasitas beban dan kegagalan lekatan (*bond failure*). Pemanfaatan limbah industri ini tidak hanya memberikan keunggulan teknis, tetapi juga menjadi solusi konstruksi hijau yang mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan mengurangi eksploitasi agregat alami.

Kata kunci: Beton SCC, Durabilitas Beton, Laju Korosi Tulangan, Slag Nikel.

1 PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur modern menuntut penggunaan material konstruksi yang memiliki performa tinggi, salah satunya adalah *Self-Compacting Concrete (SCC)*. Beton jenis ini memiliki kemampuan untuk mengalir dan mengisi ruang cetakan serta celah tulangan yang rapat tanpa bantuan alat pemadat manual. Namun, tantangan utama pada struktur beton bertulang, termasuk SCC, adalah degradasi akibat korosi pada tulangan baja. Korosi tidak hanya mengurangi luas penampang baja, tetapi juga mengakibatkan retak pada selimut beton akibat tekanan ekspansif produk karat, yang pada akhirnya dapat mengancam integritas struktural bangunan.

Di Sulawesi Selatan, khususnya di Kabupaten Bantaeng, keberadaan industri pertambangan dan pengolahan nikel seperti PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia menghasilkan limbah *slag* nikel dalam volume yang signifikan. *Slag* nikel memiliki karakteristik fisik dan kimia yang potensial untuk dimanfaatkan sebagai material konstruksi, terutama sebagai pengganti agregat halus atau pengisi dalam campuran beton. Integrasi limbah ini ke dalam beton SCC tidak hanya memberikan solusi manajemen limbah yang efektif, tetapi juga berpotensi meningkatkan kinerja mekanis beton melalui densitas struktur yang lebih baik.

Meskipun aspek mekanis sering menjadi fokus utama, daya tahan (*durability*) beton SCC berbasis *slag* nikel terhadap serangan lingkungan, terutama risiko korosi pada tulangan baja, masih memerlukan evaluasi mendalam. Kandungan kimia dalam *slag* dapat mempengaruhi porositas dan permeabilitas beton, yang pada akhirnya menentukan laju difusi ion klorida atau zat agresif lainnya menuju tulangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara spesifik bagaimana pengaruh penggunaan *slag* nikel dari PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia terhadap laju korosi tulangan baja, guna memastikan bahwa inovasi material ini tetap aman dan tahan lama untuk diaplikasikan dalam

infrastruktur jangka panjang. Slag Nikel dapat digunakan sebagai pengganti agregat, baik untuk agregat kasar maupun agregat halus (Yoel Lian Tiranda, Herman Parung, dan Desi Sandy (2021)). Beton *Self-Compacting Concrete (SCC)* mengandalkan keseimbangan antara kemampuan mengalir (*fluidity*) dan stabilitas campuran untuk mengisi bekisting tanpa bantuan vibrator. Penggunaan slag nikel sebagai substitusi agregat halus berperan krusial dalam meningkatkan kualitas beton segar melalui peningkatan kohesi campuran, yang secara efektif mencegah segregasi dan bleeding. Dengan bentuk butiran yang spesifik dan sifat filler yang dimiliki, slag nikel mampu mengoptimalkan workability sekaligus mengurangi kebutuhan air, sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih padat, homogen, dan minim risiko pengeroposan (*honeycomb*) pada area tulangan rapat. Secara mekanis dan durabilitas, integrasi slag nikel ke dalam matriks *SCC* terbukti meningkatkan kuat tekan melalui perbaikan densitas mikrostruktur dan penguatan *interfacial transition zone (ITZ)*. Sifat *pozzolanik* slag nikel membantu menutup pori-pori kapiler, yang berdampak langsung pada penurunan tingkat porositas dan daya serap air. Hasilnya, beton tidak hanya memiliki performa mekanis yang lebih unggul dibandingkan beton konvensional, tetapi juga memiliki durabilitas jangka panjang yang lebih baik terhadap serangan kimia dan penetrasi klorida, menjadikannya solusi material konstruksi hijau yang tangguh. Dalam desain beton, kinerja ditunjukkan oleh kekuatan (*strength*) dan keawetan (*durability*), dua variabel yang sangat penting. Kekuatan tanpa ketahanan yang memadai akan menyebabkan beton tidak memiliki masa pakai yang lama sesuai dengan umur rencana pelayanannya (Bahri Ahmad, Rita Irmawaty, Sumardi Hamid Aly, A. Amiruddin, 2022)).

1.2. Slag Nikel

Slag nikel merupakan produk sampingan esensial dari proses metalurgi pemurnian bijih nikel yang melibatkan tahap pemanggangan (*roasting*) dan peleburan (*smelting*) pada suhu ekstrim mencapai 1600°C. Slag nikel memiliki berat jenis yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami (Amir dkk., 2022). Proses ini secara efektif memisahkan logam nikel murni yang mengendap di dasar tungku dari material pengotor yang naik ke permukaan sebagai sisa cair. Sebagai material yang kaya akan senyawa silikat dan berbagai oksida, slag nikel memiliki struktur fisik yang stabil, lebih ringan dibandingkan logam induknya, serta memiliki ketahanan termal dan kimia yang sangat baik. Secara kimiawi, slag nikel didominasi oleh silikat kalsium, silikat magnesium, serta oksida besi dan aluminium yang memberikan sifat *pozzolanik* dan kemampuan mengikat yang kuat. Kandungan silika yang tinggi (30-40%) dan oksida besi (15-20%) berperan penting dalam meningkatkan densitas dan ketahanan korosi pada material konstruksi. Selain itu, karakteristik fisiknya yang memiliki distribusi ukuran partikel variatif—terutama pada hasil pendinginan cepat yang menghasilkan butiran halus—memungkinkannya berfungsi sebagai *filler* atau pengganti agregat halus yang superior dalam campuran beton. Pemanfaatan slag nikel dalam industri konstruksi, khususnya sebagai substitusi agregat halus pada beton, memberikan keuntungan ganda dari aspek teknis maupun lingkungan. Secara teknis, material ini meningkatkan kekuatan tekan, durabilitas terhadap lingkungan agresif seperti air laut, dan stabilitas struktur mikro beton. Secara ekologis, penggunaan slag nikel mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan mereduksi penumpukan limbah industri berbahaya di area terbuka sekaligus mengurangi eksploitasi pasir alam, sehingga menciptakan solusi pembangunan infrastruktur yang lebih hijau dan berkelanjutan. Slag Nikel memiliki tingkat kekerasan yang tinggi, sehingga membantu mengurangi pemecahan butiran (*degradasi*) akibat gesekan antar partikel saat dilewati beban berat (Atif Hussain dkk, 2024).

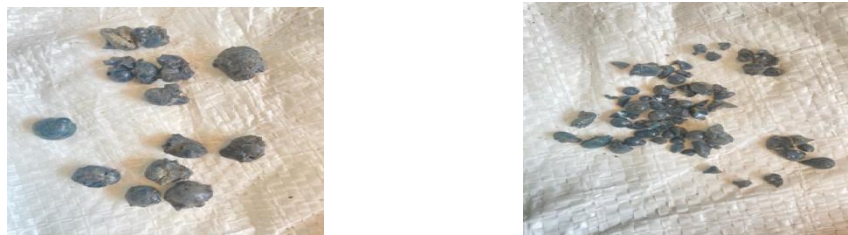
1.3. Laju Korosi pada Tulangan

Korosi pada tulangan beton merupakan proses degradasi elektrokimia yang terjadi ketika lapisan pasif pelindung pada baja rusak akibat faktor lingkungan. Penyebab paling umum adalah penetrasi klorid, yang sering ditemukan di area pesisir, serta proses karbonasi, di mana gas karbondioksida (CO_2) dari udara masuk ke dalam pori-pori beton dan menurunkan tingkat keasaman (pH) semen. Saat pH beton turun di bawah ambang batas tertentu, lapisan oksida pelindung pada besi akan hancur, memicu reaksi oksidasi yang menghasilkan karat. Dampak dari korosi ini sangat berbahaya

bagi integritas struktur karena volume karat jauh lebih besar dibandingkan volume besi aslinya. Tekanan ekspansif dari pertumbuhan karat ini menyebabkan beton retak, pecah (*spalling*), hingga terkelupas, yang pada akhirnya menghilangkan lekatan antara besi dan beton. Jika dibiarkan, penampang efektif tulangan akan terus mengecil, sehingga kapasitas beban bangunan menurun drastis dan meningkatkan risiko kegagalan struktur secara tiba-tiba tanpa peringatan dini yang jelas. Laju korosi pada tulangan beton sangat dipengaruhi oleh penetrasi agen perusak seperti klorida dan karbonasi yang merusak lapisan pasif pelindung baja. Secara teknis, laju ini diukur melalui densitas arus korosi (*icorr*) menggunakan metode elektrokimia, di mana reaksi oksidasi pada anoda menyebabkan pengurangan luas penampang tulangan secara bertahap. Tingginya porositas beton, kelembapan yang ekstrem, serta paparan lingkungan laut akan mempercepat akumulasi produk korosi (karat) yang memiliki volume lebih besar dari baja asli, sehingga menimbulkan tekanan internal yang memicu retak, *spalling* (pengelupasan), dan penurunan kapasitas struktural bangunan secara signifikan.

2 MATERIAL DAN METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan. Bahan utama adalah slag nikel yang diperoleh dari PT Huadi Nickel Alloy Indonesia di Kabupaten Bantaeng, Sulawesi Selatan.



Gambar 1. Slag nikel ukuran asli (a). (b). Slag nikel setelah abrasi.

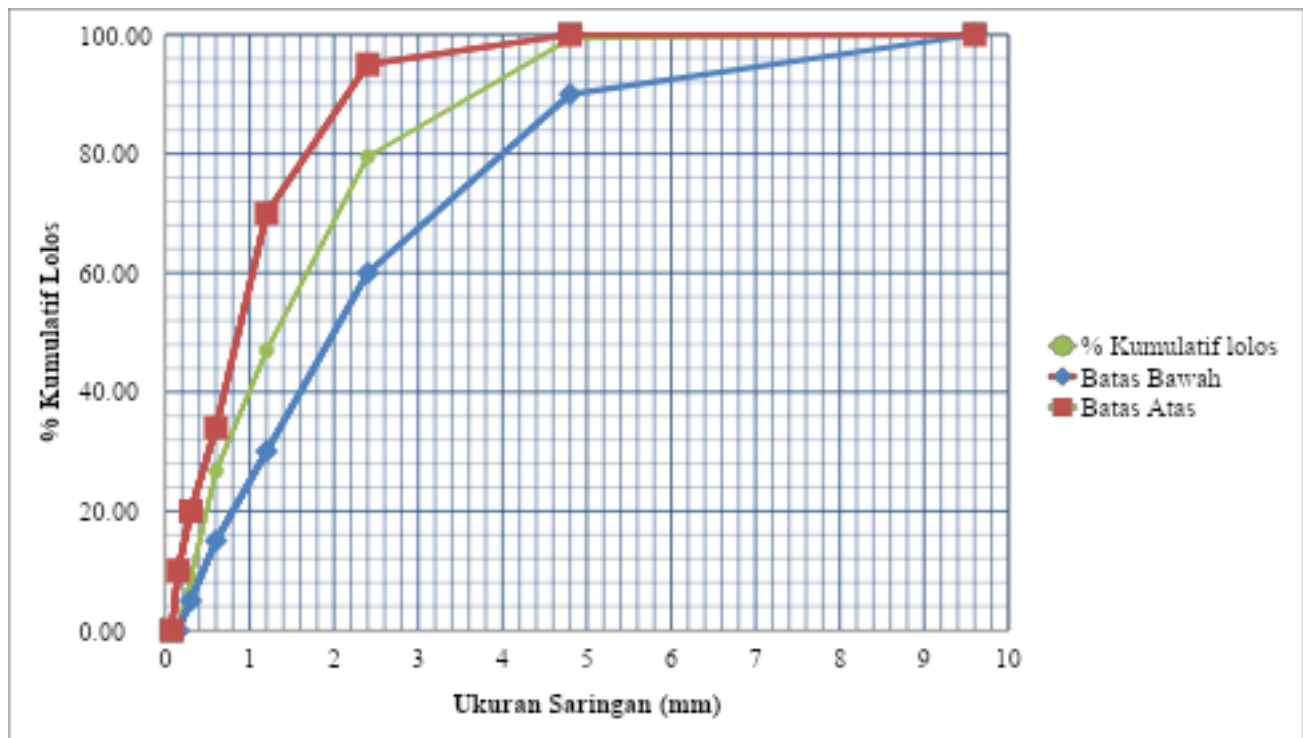
Beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) yang menggunakan slag nikel merupakan inovasi material yang menggabungkan kemampuan alir tinggi dengan pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan. Dalam campurannya, air dan semen berperan membentuk pasta pelumas yang harus memiliki viskositas tepat agar beton dapat mengalir mengisi seluruh rongga bekisting tanpa bantuan alat pemadat mekanis. Penggunaan bahan tambah (*admixture*) biasanya diperlukan untuk menjaga stabilitas campuran, sehingga meskipun sangat encer, agregat tetap tersebar merata dan tidak mengalami segregasi atau pemisahan selama proses penuangan. Implementasi slag nikel sebagai pengganti sebagian pasir atau kerikil memberikan karakteristik mekanis yang unik karena tekstur slag yang cenderung lebih tajam dan keras dibandingkan agregat alami. Secara mikrostruktur, penggunaan slag nikel dapat meningkatkan densitas beton dan memperbaiki zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone*), yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kuat tekan dan ketahanan terhadap penetrasi klorida. Kombinasi material ini tidak hanya menghasilkan struktur yang kokoh secara teknis, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada penambangan agregat sungai dan gunung, menjadikannya solusi konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

a. Slag Nikel

Karakteristik utama slag nikel, khususnya jenis *Electric Arc Furnace* (EAF), terletak pada sifat fisiknya yang memiliki tekstur permukaan kasar, bersudut (*angular*), dan densitas yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami. Secara kimiawi, material ini didominasi oleh senyawa silika (SiO_2), magnesium oksida (MgO), dan besi oksida (Fe_2O_3), yang memberikan sifat pozzolanik serta ketahanan aus yang sangat baik. Penggunaan slag nikel sebagai substitusi agregat dalam campuran

beton tidak hanya meningkatkan kuat tekan melalui ikatan mekanis yang lebih kuat antara pasta semen dan agregat, tetapi juga meningkatkan durabilitas beton terhadap lingkungan agresif karena permeabilitasnya yang rendah

Dari hasil pengujian analisa saringan diperoleh bahwa slag nikel termasuk dalam zona I agregat halus, seperti tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Analisa saringan slag nikel.

Slag nikel memiliki karakteristik fisik yang unik sebagai material konstruksi karena teksturnya yang cenderung keras, padat, dan memiliki bentuk partikel yang lebih tajam atau menyudut (*angular*) dibandingkan dengan agregat alami. Secara kimiawi, material ini bersifat pozzolanik atau memiliki kemampuan pengikat tambahan ketika bereaksi dengan semen, serta mengandung senyawa silika dan besi yang tinggi yang berkontribusi pada peningkatan densitas beton. Keunggulan utama dari slag nikel terletak pada durabilitasnya yang tinggi terhadap lingkungan korosif serta kemampuannya untuk meningkatkan kuat tekan beton melalui ikatan antarmuka yang lebih kuat antara pasta semen dan permukaan agregat yang kasar.

Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa agregat slag yang digunakan memenuhi standar secara keseluruhan dari 0% - 100% memenuhi syarat dan spesifikasi agregat yang sempurna.

b. Agregat Halus dan Agregat Kasar

Agregat halus merupakan komponen pengisi yang krusial dalam menciptakan kepadatan massa beton, di mana penggunaan slag nikel sebagai substitusi pasir alam menawarkan keunggulan pada aspek durabilitas. Slag nikel yang memiliki tekstur permukaan lebih kasar dan bersudut (*angular*) dibandingkan pasir sungai memberikan ikatan mekanis yang lebih kuat dengan pasta semen. Selain itu, sifat pozzolanik pada butiran halus slag nikel mampu bereaksi secara kimiawi membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan, yang secara efektif mengisi pori-pori mikro sehingga menghasilkan beton yang lebih kedap air dan tahan terhadap penetrasi zat kimia korosif seperti klorida. Sementara itu, pada agregat kasar, substitusi slag nikel memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kuat tekan beton karena berat jenis dan kekerasannya yang seringkali

melebihi batu pecah alami. Penggunaan slag nikel dalam ukuran granular yang lebih besar memberikan stabilitas struktural dan ketahanan terhadap beban impak yang lebih tinggi, yang sangat ideal untuk beton mutu tinggi. Meskipun berat jenis yang lebih tinggi dapat meningkatkan bobot mati struktur, integrasi slag nikel sebagai agregat kasar mampu memperbaiki karakteristik ITZ antara agregat dan matriks semen, sehingga mengurangi risiko retak internal dan meningkatkan integritas struktur beton secara keseluruhan.

c. Semen

Semen Portland Composite (PCC) merupakan jenis semen hidrolis yang dihasilkan dari penggilingan terak (*clinker*) bersama gips dan satu atau lebih bahan anorganik seperti terak tanur tiup (*blast furnace slag*), abu terbang (*fly ash*), atau batu kapur. Dibandingkan dengan Semen Portland Ordinary (Tipe I), semen PCC memiliki panas hidrasi yang lebih rendah dan pengerjaan (*workability*) yang lebih baik, sehingga lebih tahan terhadap retak rambut dan serangan sulfat ringan. Karakteristik ini menjadikannya pilihan ideal untuk berbagai aplikasi konstruksi umum, mulai dari pekerjaan beton struktural, pasangan bata, plesteran, hingga pembuatan komponen pracetak yang mengutamakan durabilitas dan aspek ramah lingkungan.

d. Bahan Tambah

Mikrosilika, atau *silica fume*, merupakan material pozzolanik ultra-halus yang berperan vital dalam menciptakan beton kinerja tinggi (BKT). Melalui ukuran partikelnya yang mencapai skala nanometer, mikrosilika bekerja dengan cara mengisi pori-pori mikroskopis dalam pasta semen serta bereaksi secara kimiawi dengan kalsium hidroksida untuk membentuk senyawa semen tambahan. Proses ini secara signifikan meningkatkan kepadatan struktur mikro beton, memperkuat ikatan antara pasta semen dan agregat, serta mengurangi permeabilitas sehingga beton menjadi lebih kedap terhadap air dan serangan zat kimia agresif seperti sulfat. Di sisi lain, penggunaan *superplasticizer* menjadi kunci utama dalam menjaga efisiensi pengerjaan beton (*workability*) tanpa harus mengorbankan kualitas mekanisnya. Bahan tambah kimia ini bekerja dengan mendispersikan gumpalan partikel semen, sehingga memungkinkan campuran beton tetap cair dan mudah mengalir meskipun menggunakan rasio air-semen yang rendah. Kombinasi sinergis antara efek pengisian mikrosilika dan kemampuan reduksi air dari *superplasticizer* menghasilkan beton dengan porositas minimum dan kekuatan tekan yang sangat tinggi, yang sangat dibutuhkan dalam pembangunan infrastruktur modern yang awet dan tahan lama.

e. Besi tulangan ulir (*deformed bar*) adalah jenis baja tulangan yang memiliki tonjolan atau sirip di sepanjang permukaannya, yang dirancang khusus untuk meningkatkan daya ikat atau *bonding* antara baja dengan beton. Berbeda dengan besi polos, sirip pada besi ulir berfungsi mencegah pergeseran tulangan di dalam struktur beton saat menerima beban tarik atau tekan, sehingga tegangan dapat tersalurkan secara lebih efektif ke seluruh elemen struktur. Karakteristik ini menjadikan besi ulir sebagai pilihan utama untuk komponen struktural kritis seperti kolom, balok, dan fondasi poer, terutama pada bangunan bertingkat atau infrastruktur yang membutuhkan daktilitas serta ketahanan tinggi terhadap gaya gempa.

f. Komposisi Benda Uji

Benda uji beton dengan substitusi slag nikel 0% berfungsi sebagai beton control (beton normal) yang menggunakan agregat alami seluruhnya tanpa ada tambahan material lainnya, dan ikatan yang terjadi pada *interfacial transition zone (ITZ)* yang terbentuk secara konvensional. Pada pembuatan beton SCC, perbedaan komposisi antara variasi SN 0% dan SN 50% terletak pada komposisi material pasir sebagai material substitusi.

Tabel 1 Komposisi Benda Uji.

Komposisi Benda Uji (SN)			
No	Material	SN 0%	SN 50%
1	Semen	570 kg	570 kg
2	Air	170 ltr	170 ltr
3	Agregat Halus/Pasir	600 kg	300 kg
4	Agregat Kasar /Kerikil	1.050 kg	1.050 kg
5	Mikrosilika	57 kg - 85,5 kg	57 kg - 85,5 kg
6	Superplastizer	1,25 kg - 6,84 kg	1,25 kg - 6,84 kg
7	Slag Nikel	0 kg	13,5 kg

2.2. Metode Uji Korosi Tulangan

Pengujian akselerasi korosi dilakukan setelah perawatan beton selama 28 hari dalam air tawar. Benda uji yang digunakan adalah beton berbentuk silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Tulangan baja ulir berdiameter 16 mm dengan panjang 40 cm ditanam pada posisi setengah diameter silinder. Pengujian laju korosi mengacu pada metode akselerasi korosi berdasarkan *Impressed Voltage Technique (IVT)*. Setengah dari tinggi benda uji (100 mm) direndam di dalam kontainer plastik yang berisi larutan NaCl 3,5%. DC Power (*Direct Current Power*) menyuplai arus sebesar 10 V ke permukaan tulangan.



Gambar 3. Pembuatan benda uji.



Gambar 4. Akselerasi korosi.

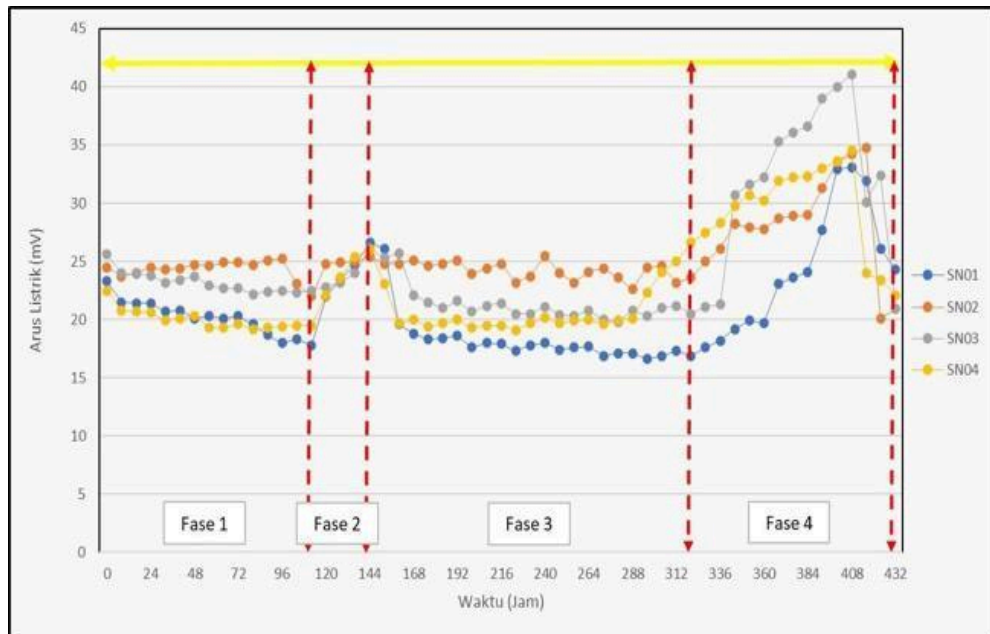
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan slag 0% sebagai agregat halus dan dijadikan sebagai beton kontrol (beton normal), dimana komposisi yang dipergunakan adalah komposisi beton seperti pasir, kerikil, semen dan air. Pada umur 28 hari, beton berfungsi sebagai tolak ukur (baseline) untuk menentukan kekuatan beton

rencana ($f'c$) dimana proses hidrasi semen telah mencapai kondisi yang stabil dan hampir sempurna. Beton dengan komposisi ini menunjukkan kepadatan yang konsisten. Beton tanpa substitusi slag (0%) cenderung memiliki laju peningkatan kekuatan yang lebih cepat pada umur awal dibandingkan dengan beton campuran slag. Pada umur 28 hari beton ini mencapai mutu beton yang diinginkan.

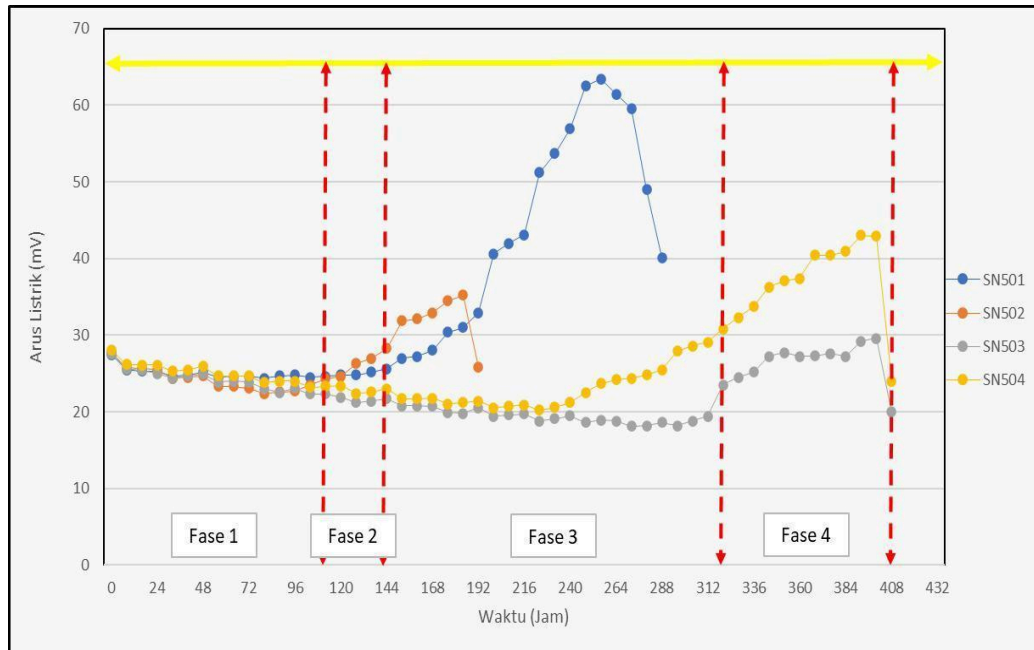
Beton dengan penggunaan slag 50% sebagai substitusi agregat halus pada campuran beton memberikan dampak yang signifikan terhadap karakteristik mekanis beton pada saat mencapai umur 28 hari, Dimana pada titik ini beton menunjukkan kekuatan yang kompetitif.

Proses akselerasi beton pada saat pengambilan data menunjukkan bahwa terjadi percepatan laju hidrasi semen dan kekuatan tekan beton dapat diketahui lebih awal dari standar 28 hari. Hal ini terjadi karena adanya bahan tambah kimia yang diberikan pada saat pencampuran beton.



Gambar 5. Grafik Hubungan arus terhadap waktu SN 0%.

Berdasarkan hasil dari pembacaan grafik yang terbagi menjadi 4 fase yaitu : fase 1, fase 2, fase 3 dan fase 4 untuk komposisi 0% SN, dimana secara umum hasil grafik terbaca bahwa setiap fase menunjukkan perilaku yang stabil di awal hingga pertengahan (fase 1-3), namun mengalami reaksi atau aktivitas yang sangat signifikan pada fase 4 (setelah jam ke-320). Penurunan tajam di akhir grafik (setelah jam 408) mengindikasikan bahwa sistem mencapai titik jenuh atau selesainya suatu proses reaksi listrik pada semua sampel. Untuk SN03 (Abu-abu) : menunjukkan aktivitas paling dinamis dan mencapai nilai arus listrik tertinggi di fase 4. SN01 (Biru): secara konsisten memiliki nilai arus listrik paling rendah dibandingkan sampel lainnya di hampir seluruh fase, terutama pada fase 3. SN02 (Oranye) & SN04 (Kuning): memiliki pola yang sangat mirip dan cenderung berada di nilai menengah (di antara SN01 dan SN03).



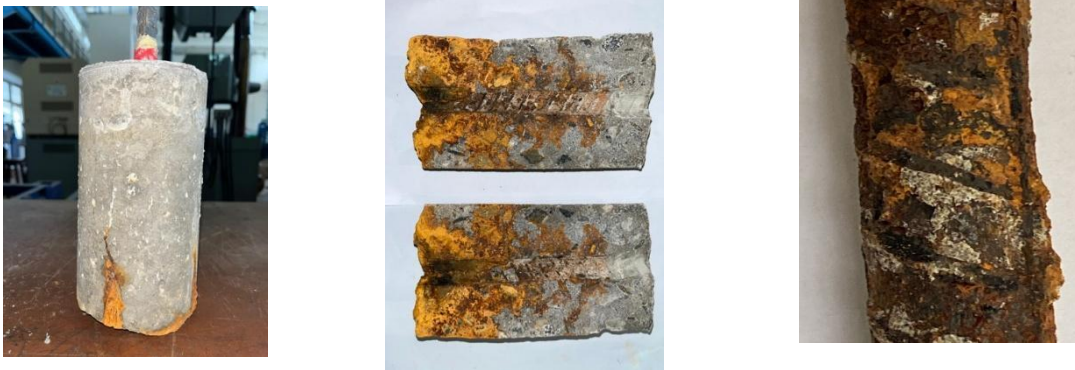
Gambar 6. Grafik hubungan waktu dengan arus terhadap waktu pada SN 50%.

Berdasarkan hasil dari pembacaan grafik yang terbagi menjadi 4 fase yaitu : fase 1, fase 2, fase 3 dan fase 4 untuk komposisi 50% SN secara keseluruhan, penggunaan campuran 50% SN substitution menghasilkan karakteristik arus listrik yang lebih bervariasi antar sampel dibandingkan dengan varian 0%. Lonjakan besar pada SN501 di fase 3 dan SN504 di fase 4 mengindikasikan adanya reaksi internal yang lebih intens (kemungkinan terkait laju korosi atau perubahan mikrostruktur material) yang terjadi pada waktu yang berbeda-beda untuk setiap spesimen. Penurunan drastis di akhir pengujian (setelah jam 408) menandakan sistem kembali ke kondisi pasif atau berakhirnya reaksi utama yang dipantau.

Lebar retak pada beton merupakan indikator krusial dalam mengevaluasi tingkat kerusakan dan durabilitas suatu struktur. Retak yang melebihi batas izin dapat memicu korosi pada baja tulangan akibat masuknya zat korosif seperti klorida dan karbon dioksida. Secara teknis lebar retak dipengaruhi oleh beberapa factor misalnya beban eksternal, efek rangkakan (*creep*), susut (*shrinkage*), rasio penulangan dan tebal selimut beton yang digunakan. Dimana aliran arus searah dengan arus yang keluar dari permukaan baja tulangan menuju elektrolit (beton) yang mengakibatkan oksidasi besi (*Fe*) menjadi ion besi (Fe^{2+}), yang secara fisik sebagai kekurangan massa atau penipisan penampang baja. Dimana semakin tinggi densitas arus yang terbaca maka akan semakin cepat pelepasan electron yang terjadi dimana pada akhirnya akan mempercepat pembentukan karat dan menurunkan ikatan (*bond strength*) antara baja dengan beton dan akan mempengaruhi lebar retak yang terjadi pada beton.

Tabel 2. Lebar retak

Lebar Retak				
Sampel	SN 0%		SN 50%	
	Min	Max	Min	Max
1	0,01	0,03	0,01	0,20
2	0,02	0,20	0,01	0,03
3	0,02	0,15	0,01	0,10
4	0,01	0,16	0,02	0,13
Rata-rata	0,02	0,14	0,01	0,12



Gambar 7. Hasil pengujian Laju Korosi Tulangan SN 0%.



Gambar 8. Hasil pengujian Laju Korosi Tulangan SN 50%.

Berdasarkan tabel 2, terlihat adanya perbedaan karakteristik antara beton normal (SN 0%) dan beton dengan substitusi slag nikel 50% (SN 50%). Berikut adalah analisis teknis singkat mengenai data tersebut:

1. Beton dengan SN 50% cenderung memiliki nilai retak minimum yang lebih konsisten dan sedikit lebih rendah (rata-rata 0,01 mm) dibandingkan SN 0% (0,02 mm). Ini mengindikasikan bahwa penggunaan slag nikel dapat membantu meningkatkan kerapatan matriks beton pada tahap awal pembebanan.
2. Terdapat penurunan rata-rata lebar retak maksimum pada sampel SN 50% (0,12 mm) dibandingkan dengan SN 0% (0,14 mm). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan 50% slag nikel sebagai agregat mampu menahan laju perambatan retak (*crack propagation*) dengan lebih baik.
3. Secara teknis, penurunan lebar retak ini berkaitan dengan sifat slag nikel yang memiliki modulus elastisitas tinggi dan bentuk butiran yang menyudut (*angular*), sehingga menciptakan ikatan antarmuka (*interfacial transition zone*) yang lebih kuat dengan pasta semen.

4. KESIMPULAN

Penggunaan slag nikel sebagai substitusi agregat halus dalam beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) terbukti meningkatkan performa mekanis dan durabilitas struktur melalui perbaikan densitas mikrostruktur serta penguatan *interfacial transition zone* (ITZ). Sifat pozzolanik yang dimiliki slag nikel berperan aktif dalam menutup pori-pori kapiler, sehingga menghasilkan

beton yang lebih padat, homogen, dan memiliki tingkat porositas serta daya serap air yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Selain memberikan keunggulan teknis seperti peningkatan kuat tekan, pemanfaatan limbah industri ini juga menjadi solusi konstruksi hijau yang berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada agregat alami dan mendukung prinsip ekonomi sirkular. Dalam hal ketahanan terhadap korosi, beton dengan substitusi slag nikel 50% menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menahan laju perambatan retak dibandingkan beton normal. Data pengujian menunjukkan bahwa rata-rata lebar retak maksimum pada sampel dengan slag nikel lebih kecil (0,12 mm) daripada beton tanpa slag (0,14 mm), yang secara langsung meminimalisasi jalur penetrasi air dan ion klorida menuju tulangan baja. Dengan terkendalinya lebar retakan, risiko degradasi struktural akibat korosi—seperti penurunan kapasitas beban, pengurangan luas penampang baja, dan kegagalan lekatan (*bond failure*)—dapat dikurangi secara signifikan, sehingga menjamin integritas dan keamanan infrastruktur dalam jangka panjang.

REFERENSI

- Andi Ahdan Amir , Sukman , Mahmud , Hasrudin (2022), *Pemanfaatan Limbah Terak Nikel Sebagai Agregat Kasar dalam Beton*, Vol. 7, No.2 ISSN 2502-8952 e-ISSN 2623- 2197
- Atif Hussain atif, Syed Khaja Karimullah Hussaini, Ph.D.(2024). *Investigation of the Performance of Steel Slag–Granite Ballast Mixture under Cyclic Loading*, Volume 24, Issue 12
- CLyde E. Kesler, (2021), *Reinforced Concrete Materials—A Remarkable Heritage*, Volume 103, Issue 4.
- D. G. Grubb, M., S. C. Jagupilla santhib and M. Wazne (2016), *Simultaneous Immobilization of Copper (Cu), Nickel (Ni), and Lead (V) Using Steel Slag Fines (Imobilisasi Simultan Tembaga (Cu), Nikel (Ni), dan Timbal (V) Menggunakan Steel Slag Fines)*.Geo Chicago
- Estefanía Cuenca , , María Criado maria., Mercedes Giménez mercedes. *Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes*. Volume 34, Issue 8.
- Fakhruddin, Mechanical and sustainability assessment of sugarcane bagasse ash and polypropylene fiber in Class C fly ash geopolymer concrete (2026).
- Jianguo Chen , Mingsheng Shi , Jiaying Du , Chunling Zhang, Yelian Gu , Zhaoqing Ye . and Bingham Xu, *Effects of Diatomite on the Physiological and Purification Performance of Diatomite-Zeolite Vegetation Concrete*, Volume 35, Issue 7.
- Lisa Oksri Nelfia, Ananda Bima Nurul Haq, Ananto Nugroho, Astri Rinanti, Bambang Endro Yuwono, Deprizon Syamsunur, Yohans Sunarno, Ouali Amiri (2024), *Karakteristik Komprehensif Beton Berkinerja Tinggi dengan Agregat Halus dan Kasar Terak Nikel*, Vol.15 No. 6
- Leo Gu Li , Ze-Cheng Lu , Pui-Lam Ng irdngpl, Zhong-Ping Chen , and Xiaowei Deng, *Reusing Waste Concrete Recycled Powder in Mortar: Paste Substitution versus Cement Substitution*. Volume 36, Issue 5
- Malhotra, V.M., (2002) . Introduction - Sustainable Development and Concrete Technology, *ACI Concrete International*, 24 (7), p. 22.
- Marios S, (2010). *Concrete Durability A practical guide to the design of durable concrete structures*, Published by Thomas Telford Limited 40 Marsh Wall, London E14 9TP. p19-24.
- Mustika, W. (2015). *Penggunaan Terak Nikel Sebagai Agregat Dalam Campuran Beton*, tesis, Universitas Udayana Denpasar, Bali.
- Meyer, C. (2002). *Concrete and Sustainable Development*. Special Publication ACI 206, *Concrete Materials Science to Application – A Tribute to Surendra P. Shah* Nordtest Method, NT BUILD 492, Approved 1999–11. *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials*, Chloride Migration Coefficient On from Non-Steady-State Migration Experiments
- Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete*. Fifth Edition Pearson Education Limited

Edinburgh Gate Harlow Essex CM20 2JE England

Navdeep Singh, Akhil Singh, Nitin Angkur, Parveen Kumar, Mahash Kumar, Taru Singh (2022). *Reviewing The Properties Of Recycled Concrete Aggregates and Iron Slag In Concrete*. *Jurnal Building Engineering* Vol 60. 105150

Oiseng Wu, Jiangmisao, Cuan Cshimping Li, Shuangxiang wang, Xiowang Zhu, Huanjun Zhu, Chuancang Zhang (2018), *Development of Autoclaved Aerated Concrete from Mechanically Activated Magnesium-Rich Nickel Slag*. vol. 30

Retno Wijaya, Satyo Astutiningsih, (2024), *Karakteristik Komprehensif Beton Berkinerja Tinggi dengan Agregat Halus dan Kasar Terak Nikel*, Vol.15 No. 6 Rita Irmawaty, Muhammad Akbar Caronge, M.W. Tjaronge Muhammad

Asad Abdurrahman, Syamsul Bahri Ahmad. (2023) *Compressive strength and corrosion behavior of steel bars embedded in concrete produced with ferronickel slag aggregate and fly ash*. *Innovative infrastructure solutions* 8:200

Syamsul Bahri Ahmad, Rita Irmawaty, Sumardi Hamid Aly, A. Amiruddin. (2022). *Performance Of Fly Ash Concrete With Nickel Slag Fine Agregate in the Marine Environment*. Vol.8 No.12

Sukarman, Erlina Yanuarini, Lilis Tiyani, Shofie Rania Salsabila, Viona Seren, (2022), *Pengaruh Substitusi Slag Nikel Dan Flyash Terhadap Kuat Tekan Beton Sebagai Pemecah Gelombang*. Volume 9, No 1

Yoel Lian Tiranda, Herman Parung, Desi Sandy (2021). *Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi Dengan Kombinasi Slag Nikel Dan Slag Baja*. Vol 3 No.