

Transformasi Limbah Slag Nikel Menjadi Agregat Beton: Analisis Performa Mekanis untuk Konstruksi Berkelanjutan

E.S. Wagola^{1*}, R. Djamaluddin¹, R. Irmawaty¹

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

*Corresponding author: wagolaunhas@gmail.com

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa mekanis beton dengan memanfaatkan limbah slag nikel sebagai substitusi agregat kasar, dengan variasi 0%, 50%, 70% dan 100%. Pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, dan kuat lentur dilakukan untuk mengevaluasi kinerja mekanis beton. Kuat tekan diuji pada umur 7 dan 28 hari, sedangkan modulus elastisitas dan kuat lentur diuji pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi 50% substitusi slag nikel memberikan kontribusi terbaik untuk performa kuat tekan dan modulus elastisitas masing-masing sebesar 23,40 MPa dan 21516,77 MPa pada umur 28 hari dengan densitas beton sebesar 2273,16 kg/m³. Nilai terendah kuat tekan terjadi pada variasi 100% dengan nilai kuat tekan sebesar 19,11 MPa, tetapi nilai ini cukup memenuhi bila direkomendasikan untuk standar mutu bagi perkerasan jalan lingkungan atau desa. Adapun untuk kuat lentur performa terbaik diberikan oleh variasi 70% penambahan slag nikel yaitu sebesar 3,36 MPa. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa slag nikel berkontribusi dengan baik dalam meningkatkan performa mekanis beton dan dapat direkomendasikan sebagai material untuk konstruksi perkerasan kaku seperti jalan desa atau jalan pertanian.

Kata kunci: Slag Nikel, Kuat Tekan, Modulus Elastisitas, Kuat Lentur.

1 PENDAHULUAN

Slag nikel adalah jenis limbah padat yang dihasilkan dalam proses peleburan konsentrat nikel sulfida. Sejumlah besar slag nikel dibuang di tempat pembuangan sampah, yang menyebabkan pencemaran lingkungan dan pemborosan sumber daya (Wang dkk., 2025). Feronikel telah menjadi jenis limbah industri peleburan terbesar keempat setelah terak tanur tinggi, terak baja, dan lumpur merah feronikel terbukti bermanfaat dalam banyak aplikasi, seperti daur ulang logam, kaca, keramik, dan bahan tahan api (Han dkk., 2023)

Indonesia memiliki cadangan nikel nomor 1 di dunia yang mencapai 72 juta ton atau 52% dari total cadangan dunia. Produksi bijih nikel Indonesia pada tahun 2019 sebesar 800 ribu ton atau sekitar 30% dari produksi total di dunia, sehingga pemerintah terus mendorong untuk program hilirisasi industri dengan mengurangi ekspor bahan mentah atau *raw material* dan pemrosesan bijih nikel di dalam negeri (Bethary & Intari, 2022). Sebagai limbah buangan hasil pengolahan bijih nikel, selama ini terak hanya digunakan sebagai bahan timbunan yang kurang memiliki nilai ekonomis. Jika dilihat secara visual, bentuk fisik dari terak nikel ini menyerupai agregat, baik yang halus menyerupai pasir maupun yang kasar menyerupai kerikil yang biasa digunakan untuk agregat dalam campuran beton (Mustika dkk., 2016).

Pemanfaatan slag nikel dalam konstruksi tidak hanya memberikan solusi terhadap masalah limbah industri, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan eksploitasi sumber daya alam. Substitusi material konvensional dengan slag nikel dapat mengurangi kebutuhan agregat alami, mengurangi biaya produksi, dan menurunkan emisi gas rumah kaca (Rambak dkk., 2025). Terak nikel Indonesia dari proses peleburan bijih nikel lateritik di Sulawesi termasuk kategori high Fe dan berpotensi untuk dapat digunakan sebagai material alternatif agregat kasar ataupun halus pada beton dan mortar (Wijaya & Astutiningsih, 2021). Menurut (Kaselle dkk., 2024), Slag nikel dengan bentuk gradasinya yang seragam dapat mengisi rongga antara kerikil sehingga dapat memberikan material yang kompak dan memiliki kuat tekan yang tinggi. Penggunaan slag nikel sebagai agregat kasar dan halus maupun hanya sebagai agregat kasar mempunyai kekuatan tekan, tarik, modulus elastisitas, dan berat volume lebih tinggi, begitu juga susut yang relatif kecil dari beton normal (Kaselle dkk., 2021).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP No. 22 Tahun, 2021) tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah slag nikel resmi dikeluarkan dari kategori limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) di Indonesia sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sisa hasil pengolahan dan pemurnian (SHPP).

Penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat kasar pada beton menunjukkan kuat tekan beton slag nikel jauh lebih kuat dari pada beton yang menggunakan agregat kasar alami dengan proporsi campuran yang sama, sehingga beton masih melakukan proses hidrasi setelah 28 hari. Slag nikel juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti agregat halus dalam pembuatan beton, penggunaan pasir dapat dikurangi dan volume limbah slag nikel yang dihasilkan setiap hari dapat diminimalkan Cendrasari. (2025).

Daerah Sulawesi merupakan salah satu penghasil biji Nikel terbesar di Indonesia sehingga limbah Slag Nikel sendiri cukup mudah ditemukan dan dapat digunakan kembali menjadi material baru (Kaselle dkk., 2024). Saat ini banyak ditemukan tumpukan limbah slag nikel di kawasan industri peleburan biji nikel di Kabupaten Bantaeng Provinsi Sulawesi Selatan. Hal ini cukup mengkhawatirkan bagi kawasan disekitarnya. Dengan kondisi tersebut, maka perlu untuk dilakukan kajian untuk memanfaatkan limbah slag nikel ini sebagai bahan substitusi di dalam campuran beton sebagai material alternatif untuk konstruksi yang berkelanjutan.

2 METODE PENELITIAN

2.1 Material Penyusun Beton

Material yang digunakan dalam penelitian ini ialah material lokal seperti batu pecah dan pasir yang berasal dari kuari Bili-bili Kabupaten Gowa sehingga karakteristik dari batu pecah maupun pasir dari kuari ini diperiksa sesuai standar yang berlaku. Demikian juga dengan material substitusi pengganti agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu slag nikel. Slag nikel yang digunakan berasal dari fasilitas industri pengolahan bijih nikel di Kabupaten Bantaeng. Adapun material yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan oleh Gambar 1.



Gambar 1 Material dalam kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD).

Gambar 1 menampilkan material penyusun beton berupa pasir, batu pecah, dan slag nikel. Semua material yang digunakan dalam penelitian ini sudah dalam kondisi SSD. Agregat halus (pasir) memiliki modulus kehalusan sebesar 1,93. Agregat kasar adalah material yang lolos saringan 1 inci dan tertahan di saringan No 4 (4,75 mm) dengan modulus kehalusan sebesar 6,66 untuk batu pecah dan 6,61 untuk slag nikel.

Pemeriksaan karakteristik agregat dalam penelitian ini mengacu pada standar yang berlaku, baik untuk agregat kasar maupun agregat halus. Adapun standar pemeriksaan karakteristik agregat kasar dan halus mengacu pada *American Society for Testing and Materials* (ASTM) maupun Standar Nasional Indonesia (SNI). Karakteristik agregat berupa modulus kehalusan, berat jenis, *water absorption*, kadar air, kadar lumpur, kadar organik, keausan agregat, berat volume, dan sifat kekekalan agregat. Tabel 1 menyajikan data karakteristik material penyusun beton sesuai standar yang disyaratkan.

Tabel 1 Data uji karakteristik fisik agregat kasar dan agregat halus

No.	Uraian Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian			Keterangan	Standar Spesifikasi	
			Pasir	Batu Pecah 1-2	Slag Nikel		Agregat Halus	Agregat Kasar
1	Modulus Kehalusan	%	1,93	6,66	6,61	Pasir <i>TM</i>	2,2 - 3,1	5,5 - 8,5
2	Berat Jenis Semu	-	2,60	2,78	2,88	<i>M</i>	1,6 - 3,2	1,6 - 3,2
3	Berat Jenis Kering	-	2,00	2,50	2,83	<i>M</i>	1,6 - 3,2	1,6 - 3,2
4	Berat Jenis SSD	-	2,23	2,60	2,85	<i>M</i>	1,6 - 3,2	1,6 - 3,2
5	Water Absorption	%	11,40	4,05	0,60	Pasir dan batu pecah <i>TM</i>	0,2 - 2,0	0,2 - 4,0
6	Kadar Air	%	9,12	1,51	0,02	Slag Nikel dan Pasir, <i>TM</i>	3,0 - 5,0	0,5 - 2,0
7	Kadar Lumpur	%	2,82	0,74	1,36	Slag Nikel, <i>TM</i>	0,2 - 6,0	0,2 - 1,0
8	Kadar Organik	No.	1			<i>M</i>	< No. 3	
9	Keausan Agregat	%		28,98	46,83	Slag Nikel, <i>TM</i>		Max. 40%
10	Berat Volume Gembur	kg/ltr	1,31	1,29	1,63	<i>M</i>		
11	Berat Volume Padat	kg/ltr	1,40	1,42	1,65	Batu Pecah <i>TM</i>	1,4 - 1,9	1,5 - 1,9
12	Kekekalan Agregat	%			1,16	<i>M</i>		Max 12%

Ket: *M* = Memenuhi, *TM* = Tidak Memenuhi

Sumber: Data Penelitian

Data pemeriksaan karakteristik agregat menunjukkan bahwa sebagian data karakteristik material sudah memenuhi, tetapi terdapat beberapa data pemeriksaan yang belum memenuhi standar spesifikasi seperti: modulus kehalusan untuk pasir, *Water Absorption* untuk pasir dan batu pecah melebihi standar, kadar air pasir melebihi standar dan slag nikel kurang dari standar. Kemudian keausan dan kadar lumpur untuk slag nikel, dan berat volume padat untuk batu pecah. Namun demikian, secara teknis semua agregat dapat direkomendasikan sebagai material dalam campuran beton sebab hampir sebagian besar data telah memenuhi standar spesifikasi yang disyaratkan.

2.2 Rancangan Campuran Beton dengan Metode ACI

Rancangan campuran beton dalam penelitian ini mengacu pada metode ACI. Rancangan campuran beton dibuat untuk empat variasi penambahan slag nikel di dalam campuran beton dengan variasi 0%, 50%, 70% dan 100% menggantikan agregat kasar (batu pecah). Perhitungan rancangan campuran beton dalam penelitian ini menggunakan FAS 0.35. Adapun hasil komposisi rancangan campuran beton untuk empat variasi penambahan slag nikel disajikan oleh Tabel 2.

Tabel 2 Komposisi campuran beton (kg/m³)

Material	Mix 1 (slag 0%)	Mix 2 (slag 50%)	Mix 3 (slag 70%)	Mix 4 (slag 100%)
Air	175.00	175.00	175.00	175.00
Semen	500.00	500.00	500.00	500.00
Pasir	558.98	558.98	558.98	558.98
Batu pecah	978.38	511.90	312.59	-
Slag Nikel	-	511.90	729.38	1069.23
Viscocrete 3115N	3.00	3.00	3.00	3.00

Sumber: Data Penelitian

2.3 Pengujian Beton Segar

Pengujian slump beton segar dalam penelitian ini dilakukan sesuai dengan standar SNI 1972: 2008 tentang Cara Uji Slump Beton. Pengujian slump bertujuan untuk mengukur tingkat kekentalan adukan beton, yang mencerminkan kemudahan pengerjaan (*workability*) beton saat diaduk, diangkut, dituang, dan dipadatkan tanpa menimbulkan porositas maupun segregasi (pemisahan bahan penyusun beton). Slump beton didefinisikan sebagai penurunan ketinggian pada titik tengah permukaan atas beton setelah cetakan uji slump diangkat. Adapun nilai slump yang akan dicapai dalam penelitian ini ialah 10 cm seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Pengukuran nilai slump.

2.4 Pembuatan Benda Uji

2.4.1. Benda Uji Silinder Beton

Benda uji silinder dalam penelitian ini dibuat dengan dimensi diameter 100 mm dan tinggi 200 mm, dan dibuat sebanyak 24 buah untuk empat variasi penambahan slag nikel, dengan masing-masing variasi sebanyak 6 benda uji silinder beton. Pembuatan benda uji silinder beton mengacu pada SNI 2493: 2011 tentang tata cara pembuatan dan perawatan benda uji di laboratorium. Selanjutnya, benda uji yang dibuat akan diuji kuat tekannya untuk setiap variasi penambahan slag nikel, dan pengujian kuat tekan beton mengacu pada SNI 1974: 2011 tentang cara pengujian kuat tekan beton dengan benda uji silinder.

Formula yang digunakan untuk menghitung besarnya kuat tekan beton berdasarkan percobaan di laboratorium dapat dilihat pada persamaan 1.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dengan:

f'_c = Kuat Tekan (MPa)

P = Beban Tekan (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

Adapun variasi dan jumlah benda uji silinder beton disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Variasi benda uji silinder

Kode Benda Uji	Slag Nikel	Umur Benda Uji	Jumlah Benda Uji
BN	0%	7 dan 28 Hari	6
BS50	50%	7 dan 28 Hari	6
BS70	70%	7 dan 28 Hari	6
BS100	100%	7 dan 28 Hari	6
Total			24

Selain itu, dilakukan pengujian nilai modulus elastisitas beton, pengujian ini dimaksudkan untuk mengukur kekakuan dari pada beton yang direncanakan. Pengujian modulus elastisitas beton mengacu pada ASTM C 469 - 02.2009, Persamaan untuk menghitung modulus elastisitas (E) berdasarkan ASTM C469 - 02 adalah sebagai berikut:

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \tag{2}$$

Dengan:

E_c = Modulus elastisitas (N/m²)

S_1 = Tegangan pada 40% dari beban ultimate (N/m²)

S_2 = Tegangan pada regangan awal (biasanya sangat kecil pada $\epsilon_1 = 0,00005$)

ϵ_1 = Regangan aksial pada 40% beban

$\epsilon_2 = 0,00005$ (regangan awal)

2.4.2. Benda Uji Balok Lentur

Pengujian kuat lentur beton, atau *Modulus of Rupture* (MOR), adalah prosedur laboratorium untuk mengukur seberapa besar kekuatan beton menahan gaya yang menyebabkan tekukan atau lenturan. Pengujian ini mengacu pada SNI 4154: 2014 dan dilakukan pada sampel balok beton dengan memberikan beban di bagian tengahnya hingga retak dan patah. Hasil pengujian ini, yang disebut MOR, adalah indikator utama kualitas beton dalam aplikasi yang menerima beban lentur, seperti pada konstruksi jalan beton (*rigid pavement*), lantai pabrik, dan gelagar jembatan.

Adapun benda uji balok lentur yang digunakan dalam penelitian ini ialah benda uji dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 400 mm. Dan benda uji kuat lentur akan dibuat sebanyak 12 sampel untuk tiap variasi pemakaian slag nikel. Jumlah variasi benda uji untuk balok lentur diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Variasi benda uji balok lentur

Kode Benda Uji	Slag Nikel	Umur Benda Uji	Jumlah Benda Uji
BN	0%	28 Hari	3
BS50	50%	28 Hari	3
BS70	70%	28 Hari	3
BS100	100%	28 Hari	3
Total			12

Adapun perhitungan nilai *Modulus of Rupture* (MOR) dengan persamaan berikut:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \tag{3}$$

Dengan:

R : adalah modulus runtuh, MPa [psi],

P : adalah beban maksimum yang diterapkan ditunjukkan oleh mesin uji, N [lbf],

L : adalah panjang bentang, mm [in.],

b : adalah lebar rata-rata spesimen di daerah runtuh, mm [in.], dan

d : adalah tinggi rata-rata spesimen di daerah runtuh, mm [in.].

2.5 Perawatan benda uji

Perawatan benda uji dilakukan sesuai dengan prosedur yang ditetapkan oleh standar SNI 2493:2011 tata cara pembuatan dan perawatan benda uji di laboratorium. perawatan benda uji dilakukan dengan menutupi sampel beton dengan karung yang dibasahi pada kondisi suhu ruangan. Adapun proses perawatan benda uji untuk 4 variasi penambahan slag nikel serta proses diperlihatkan oleh Gambar 3.

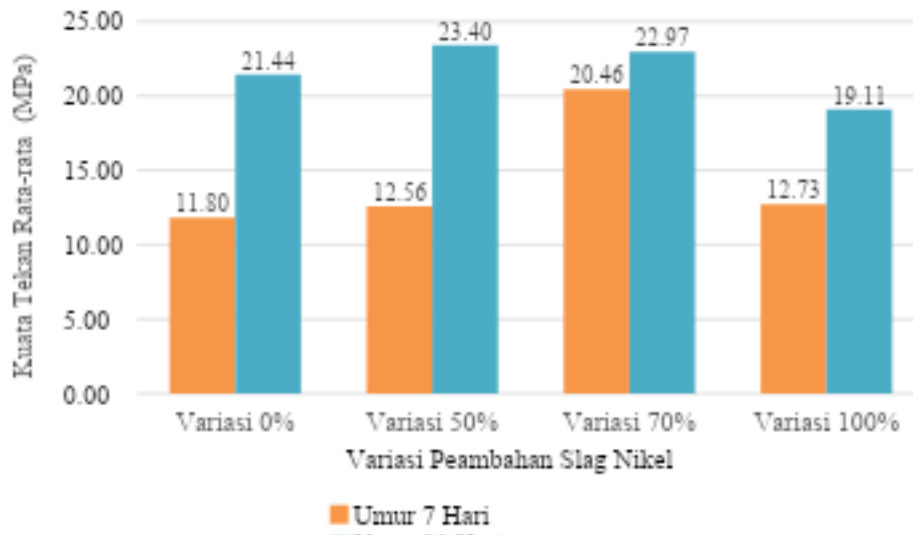


Gambar 3 Proses perawatan (*curing*) benda uji.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan saat beton berumur 7 dan 28 hari dan mengacu pada standar (SNI 1974: 2011). Pengujian kuat tekan beton umur 7 hari menggunakan mesin uji *Compression Testing Machine* (CTM) dan untuk beton umur 28 hari menggunakan mesin uji *Universal Testing Machine* (UTM), sebab pada umur 28 hari ini juga di ambil nilai modulus elastisitas dari benda uji silinder beton. Adapun hasil uji kuat tekan beton diperlihatkan oleh **Error! Reference source not found.**



Gambar 4 Diagram kenaikan kuat tekan beton untuk variasi penambahan slag nikel.

Pada Gambar 4, menunjukkan pertumbuhan nilai kuat tekan beton, dengan persentase kenaikan kuat tekan beton cenderung naik dengan bertambahnya umur beton. Nilai kuat tekan tertinggi yaitu 23,40 MPa untuk variasi 50% dengan persentase kenaikan kuat tekan sebesar 86.31%. Kuat tekan terendah yaitu 19,11 MPa untuk variasi 100% dengan persentase kenaikan kuat tekan sebesar 50.10%. Terlihat juga bahwa pengaruh kenaikan beton tertinggi untuk kadar menengah substitusi slag nikel dalam campuran beton ini disebabkan oleh adanya efek *interlocking* (penguncian), karena slag nikel yang berbentuk granular sering kali memiliki tekstur permukaan yang lebih kasar dan bentuk yang lebih bersudut (*angular*) dibandingkan batu pecah alami. Hal ini menciptakan ikatan mekanis (*interlocking*) yang lebih kuat antara agregat dan pasta semen. Selain itu, gradasi butiran yang lebih rapat dengan penambahan slag nikel dalam campuran beton dapat mengisi rongga-rongga (*pori*) yang biasanya tidak terisi oleh batu pecah biasa. Campuran yang lebih padat menghasilkan massa yang lebih solid, yang secara langsung meningkatkan kapasitas menahan beban tekan. Di samping itu, pada penggantian total 100% slag nikel, terjadi perubahan drastis pada zona transisi antara pasta semen dan agregat atau dikenal dengan istilah *Interfacial Transition Zone* (ITZ). Jika karakteristik kimia atau fisik slag nikel terlalu dominan, ikatan kimiawi di area kritis ini bisa melemah dibandingkan dengan penggunaan campuran agregat alami. Namun demikian secara menyeluruh penambahan slag nikel di dalam campuran beton membetrakan kontribusi yang positif terhadap kenaikan nilai kuat tekan beton.

3.2 Densitas Beton

Densitas (massa jenis) pada silinder beton adalah prosedur fundamental dalam pengujian material konstruksi. Densitas beton merupakan indikator utama kualitas, konsistensi, dan sifat mekanik beton, serta untuk memverifikasi tingkat kepadatan beton. Adapun nilai densitas sampel silinder beton untuk berbagai variasi penambahan slag nikel diperlihatkan oleh Tabel 5.

Tabel 5 Rekapitulasi densitas silinder beton

Kode Sampel	Umur Beton (hari)	Berat rata-rata sampel (kg)	Volume (m ³)	Densitas (ρ) (kg/m ³)	Variasi Slag Nikel (%)
BN	7	3,483	0,0015708	2217,56	0%
	28	3,539	0,0015708	2252,79	
BS50	7	3,527	0,0015708	2245,57	50%
	28	3,571	0,0015708	2273,16	
BS70	7	3,651	0,0015708	2324,09	70%
	28	3,639	0,0015708	2316,87	
BS100	7	3,733	0,0015708	2376,71	100%
	28	3,708	0,0015708	2360,59	

Sumber : Hasil penelitian

Tabel 5 memperlihatkan bahwa nilai rata-rata densitas semakin meningkat dengan bertambahnya komposisi slag nikel di dalam campuran beton. Nilai densitas tertinggi tercapai pada variasi substitusi slag nikel 100% dalam campuran beton, sedangkan nilai densitas terendah tercapai pada variasi normal tanpa penambahan slag nikel.

3.3 Modulus Elastisitas Beton

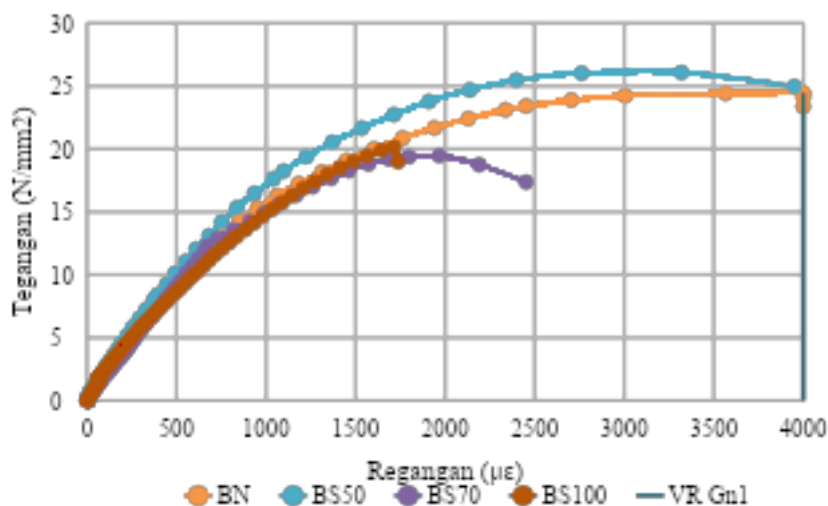
Pengujian modulus elastisitas dilakukan untuk mengukur tingkat "kekakuan" beton, yaitu kemampuannya untuk berdeformasi elastis di bawah beban dan kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan. pengujian modulus elastisitas menjembatani kesenjangan antara asumsi teoritis dalam perhitungan di atas kertas dan perilaku nyata material beton di lapangan. Hal ini memastikan bahwa struktur tidak hanya kuat menahan beban maksimum, tetapi juga cukup kaku untuk berfungsi dengan baik dan nyaman digunakan selama masa layan.

Hasil pengujian modulus elastisitas untuk setiap variasi penambahan slag nikel dalam campuran beton diperlihatkan pada Tabel 6 dan Gambar 5.

Tabel 6 Contoh perhitungan Modulus elastisitas beton

Sampel	Umur (hari)	Densitas (ρ) (kg/m ³)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	S2 (MPa)	S1 (MPa)	ϵ_2 ($\mu\epsilon$)	Modulus Elastisitas (MPa)
BN	28	2252,79	21.44	9.78	1.3788	0.000493	18968.86
BS50	28	2273,16	23.40	10.43	0.4879	0.000512	21516.77
BS70	28	2316,87	22.96	7.79	1.0818	0.000425	17887.19
BS100	28	2360,59	19.11	8.06	1.2303	0.000457	16767.23

Sumber : Hasil penelitian



Gambar 5 Grafik kombinasi hubungan tegangan regangan beton dengan variasi penambahan slag nikel.

Gambar 5, menyajikan grafik hubungan tegangan-regangan (*stress-strain*) dari benda uji beton pada umur 28 hari. Grafik ini membandingkan perilaku mekanis beton normal (BN) terhadap beton dengan variasi substitusi slag nikel sebesar 50% (BS50), 70% (BS70), dan 100% (BS100) sebagai pengganti agregat kasar. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana limbah slag nikel mempengaruhi kekakuan dan elastisitas beton. Dari grafik terlihat bahwa setiap variasi campuran menghasilkan kurva yang khas, di mana tegangan meningkat seiring dengan pertambahan regangan ($\mu\epsilon$). Kemiringan (gradien) dari kurva ini pada fase elastis linier mencerminkan nilai Modulus Elastisitas beton. Semakin curam kurvanya, semakin tinggi modulus elastisitasnya, yang berarti beton tersebut semakin kaku.

Kurva BS50 menunjukkan kemiringan yang paling curam di antara semua variasi. Hal ini mengindikasikan bahwa beton dengan variasi substitusi slag nikel 50% memiliki kekakuan tertinggi. Data pada Tabel 6, mengkonfirmasi hal ini dengan nilai modulus elastisitas BS50 sebesar 21516,77 MPa, yang merupakan nilai tertinggi dan bahkan melampaui beton normal (BN). Ini menandakan bahwa proporsi 50% merupakan titik optimal karena material slag nikel mampu mengisi rongga dan membentuk ikatan pasta yang lebih padat dan kaku.

Beton normal tanpa slag (BN) menunjukkan kurva dengan kemiringan yang cukup curam, menandakan kekakuan yang baik. Nilai modulus elastisitasnya tercatat sebesar 18968,86 MPa. Meskipun baik, performanya masih di bawah BS50, yang mengindikasikan bahwa penambahan slag dalam proporsi tertentu justru dapat meningkatkan kekakuan beton dibandingkan campuran konvensional. Demikian pula untuk variasi dengan Slag Tinggi (BS70 dan BS100) untuk kedua variasi ini menunjukkan kemiringan kurva yang lebih landai dibandingkan BN dan BS50. Kelandaian ini mengindikasikan penurunan kekakuan atau modulus elastisitas. BS70 memiliki modulus 17887,19 MPa dan BS100 berada di posisi terendah dengan 16767,23 MPa. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh tingginya kadar slag yang mengganggu reaksi hidrasi semen atau menyebabkan peningkatan porositas internal, sehingga beton menjadi lebih fleksibel (kurang kaku) dan berpotensi menurunkan ketahanan terhadap deformasi.

3.4 Kuat Lentur Beton (MOR)

Pengujian *Modulus of Rupture* (MOR) atau kuat lentur beton merupakan salah satu pengujian yang sangat penting dalam teknologi beton, terutama untuk struktur yang menerima beban lentur seperti perkerasan kaku untuk jalan. Pengujian *Modulus of Rupture* (MOR) pada beton adalah sebuah keharusan, terutama ketika beton tersebut akan difungsikan sebagai elemen yang menerima beban lentur. Pengujian ini menjembatani kesenjangan antara teori desain dan perilaku aktual material di lapangan. Ia tidak hanya menyediakan data akurat mengenai kuat tarik lentur untuk desain yang aman dan ekonomis, tetapi juga bertindak sebagai alat kontrol kualitas yang peka terhadap perubahan komposisi material. Adapun benda uji balok beton yang digunakan pada penelitian ini ialah benda uji dengan dimensi (400 mm x 100 mm x 100 mm) dan jarak antar perletakan 300 mm, yang akan diuji hingga mencapai beban maksimum (P). Dengan demikian, pengujian MOR memastikan bahwa struktur beton tidak hanya kuat secara tekan, tetapi juga tangguh dan tahan lama terhadap beban lentur yang menjadi mode kegagalan utamanya dalam aplikasi seperti jalan, jembatan, dan lantai pabrik. Adapun hasil rekapitulasi uji kuat lentur beton dari penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Rekapitulasi kuat lentur beton

Kode Benda Uji	Massa Benda Uji (m)	Dimensi			Jarak antar perletakan (l)	Beban Maksimum (P)	Kuat Lentur	Variasi Penambahan Slag Nikel
		P	L	T				
	kg	m	m	mm	mm	kN	MPa	
BN 1	9,106	40 0	10 0	100	300	10,20	3,06	
BN 2	9,072	40 0	10 0	100	300	8,26	2,48*	0%
BN 3	9,200	40 0	10 0	100	300	10,06	3,02	
Rata-rata							3,04	

BS50 1	9,676	40 0	10 0	100	300	10,13	3,04		
BS50 2	9,632	40 0	10 0	100	300	5,53	1,66*	50%	
BS50 3	9,440	40 0	10 0	100	300	8,00	2,40		
Rata-rata							2,72		
BS70 1	9,706	40 0	10 0	100	300	11,20	3,36		
BS70 2	9,798	40 0	10 0	100	300	10,33	3,10	70%	
BS70 3	9,716	40 0	10 0	100	300	12,06	3,62		
Rata-rata							3,36		
BS100 1	9,942	40 0	10 0	100	300	10,33	3,10		
BS100 2	9,920	40 0	10 0	100	300	9,93	2,98	100%	
BS100 3	9,698	40 0	10 0	100	300	8,33	2,50		
Rata-rata							2,86		

Sumber : Hasil penelitian,

Catatan : (*) data tidak dipakai dalam perhitungan rata-rata

Pada Tabel 7, terlihat ada dua sampel, yaitu BN 2 dan BS50 2 memiliki nilai kuat lentur yang sangat rendah. Hal ini disebabkan oleh proses pemadatan yang kurang maksimal saat pengecoran berlangsung, sehingga kepadatan menjadi berkurang dan berdampak pada penurunan kuat lentur.

Pada Tabel 7, juga terlihat jelas bahwa kuat lentur rata-rata pada variasi 50% mengalami penurunan terhadap variasi 0% (kontrol) sebesar 0,32 MPa (11,76%). Pengaruh ini terindikasi akibat lekatan pasta dan material slag nikel sedikit kurang baik sehingga berdampak pada kuat lentur beton, dan hal ini dapat dikonfirmasi seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Tekstur potongan penampang balok lentur sampel 2 variasi 50%.

Pada Gambar 6, terlihat jelas lekatan antara pasta semen dengan slag nikel sedikit kurang baik sehingga material slag nikel terlepas dari pasta semen dalam campuran beton, seperti pada gambar yang dilingkari. Hal ini yang kemudian berpengaruh terhadap kinerja lentur beberapa sampel untuk variasi 50% sehingga mengalami sedikit penurunan.

Pada variasi 70%, kuat lentur rata-rata mengalami kenaikan menjadi 3,36 MPa atau sekitar 0,64 MPa (23,53%) terhadap kuat lentur variasi 50%. Hal ini dipengaruhi lekatan yang baik antara material slag nikel dengan pasta semen pada campuran beton, sehingga untuk variasi ini seluruh sampel menunjukkan kinerja kuat lentur yang baik dan seragam.

Pada variasi 100%, nilai kuat lentur rata-rata kembali mengalami penurunan. Hal ini dipengaruhi oleh faktor lekatan antara pasta semen dengan slag nikel sedikit kurang baik sehingga berdampak terhadap kinerja kuat lentur beton. Apabila agregat kasar memiliki lekatan yang baik dengan pasta semen, maka material tersebut akan patah

dan tidak terlepas dari campuran beton seperti pada Gambar 7. Adapun gambaran lekatan yang kurang baik antara material slag nikel dengan campuran beton dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Tekstur potongan penampang balok lentur sampel 3 variasi 100%.

Dari hasil penelitian dan pembahasan terhadap pengaruh penambahan slag nikel terhadap kinerja mekanis beton, dapat dijelaskan bahwa untuk semua variasi penambahan slag nikel dalam campuran beton memberikan kontribusi positif terhadap performa mekanis beton.

Oleh karena itu, pemanfaatan slag nikel dengan komposisi 100% slag nikel di dalam campuran beton dapat direkomendasikan sebagai material penyusun beton pada infrastruktur seperti jalan desa atau jalan pertanian. Dengan nilai kuat tekan sebesar 19,11 MPa, komposisi tersebut dapat dimanfaatkan untuk jalan dengan tingkat lalu lintas rendah. Apabila komposisi tersebut akan dimanfaatkan untuk jalan dengan tingkat lalu lintas yang tinggi, maka slag nikel harus dikombinasikan dengan batu pecah agar dapat meningkatkan mutu dari beton tersebut. Hal ini dikarenakan nilai keausan slag nikel yang berpengaruh terhadap peningkatan kuat tekan beton, sehingga material tersebut harus dikombinasikan dengan batu pecah untuk mencapai nilai kuat tekan yang lebih baik.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Variasi 50% penambahan slag nikel merupakan variasi dengan kontribusi yang baik terhadap peningkatan performa kuat tekan dan modulus elastisitas. Variasi 100% penambahan slag nikel merupakan variasi dengan nilai kuat tekan terendah yaitu sebesar 19,11 MPa, tetapi nilai ini dapat direkomendasikan sebagai mutu standar bagi perkerasan jalan lingkungan atau jalan desa. Variasi 70% penambahan slag nikel merupakan variasi dengan performa kuat lentur yang baik. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa slag nikel berkontribusi dengan baik sebagai bahan substitusi dalam meningkatkan performa mekanis beton.

REFERENSI

- ASTM C 469 - 02. (2009). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson ' s Ratio of Concrete. i*.
- Bethary, R. T., & Intari, D. E. (2022). *Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan. 11(1)*.
- Cendrasari, A. U. (2025). *Pengaruh Limbah Nikel (Slag) Sebagai Bahan Pengganti Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton Fc ' 20 Mpa. 25, 722–731*.
- Han, F., Zhang, H., Li, Y., & Zhang, Z. (2023). Recycling and comprehensive utilization of ferronickel slag in concrete. *Journal of Cleaner Production, 414*(May), 137633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137633>
- Kasele et al. (2021). *Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer Effect of Using Nickel Slag on the Compressive an Flexural Strenght of Geopolymer Concrete. 1(2)*.
- Kaselle et al. (2024). *Pengaruh Slag Nikel Pada Beton Mutu Tinggi Dengan Perawatan Steam Curing Effect of Nickel Slag on High Quality Concrete with Steam Curing. 4(1)*.
- Mustika et al. (2016). *Penggunaan Terak NikelL Sebagai Agregat Dalam Campuran Beton. 4(2), 36–45*.
- PP No. 22 Tahun. (2021). *Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. 097095*.
- Rambak, E. P., Wardani, A., Darwis, M., Rahman, L., & Hasudungan, R. A. (2025). *Studi Literatur : Potensi Pemanfaatan Slag Nikel sebagai Material Alternatif Ramah Lingkungan dalam Konstruksi Berkelanjutan. 10(April)*.

SNI 1972: (2008). *Cara uji slump beton*.

SNI 1974: (2011). *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*.

SNI 2493: (2011). *Tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium*.

SNI 4154: (2014). *Metode uji kekuatan lentur beton (menggunakan balok sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang) Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)*.

Wang, G., Li, Z., Li, X., Cui, Y., Qiu, G., Yang, Y., & Wang, W. (2025). Diversified Utilization of Nickel Slag : A Review. *Minerals Engineering*, 234(July), 109680. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109680>

Wijaya, R., & Astutiningsih, S. (2021). *Studi Literatur Potensi Pemanfaatan Terak Nikel (Slag Nikel) sebagai Agregat pada Mortar dan Beton*. 9(85), 93–100.