

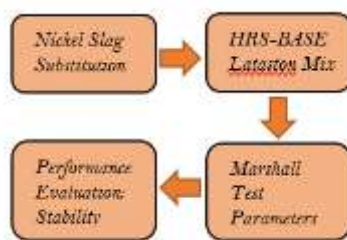
Pengaruh Variasi Slag Nikel Sebagai Substitusi Agregat Halus Pada Karakteristik Campuran Aspal Beton (HRS BASE)

Article history
Received

Iksan Hadi, Sudirman Hi. Umar, Muhammad Darwis, Muhammad Taufiq Y.S
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Khairun, Ternate,
Indonesia

*Corresponding author
sudirman@unkhair.ac.id

Graphical abstract



Abstrak

Lapisan tipis aspal beton (Laston) merupakan jenis perkerasan yang umum digunakan di Indonesia karena memiliki keunggulan kedap air dan stabilitas yang tinggi sehingga mampu memikul beban besar. Namun, perkerasan ini rentan mengalami deformasi alur (rutting) dan retak akibat kelelahan (fatigue) yang disebabkan oleh faktor cuaca serta kualitas aspal dan agregat yang kurang baik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh variasi kadar slag nikel terhadap karakteristik campuran Laston HRS-BASE. Slag nikel digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus yang lolos saringan No. 8 dan tertahan pada saringan No. 200, tanpa melalui penyetaraan volume. Variasi slag nikel yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pengujian dilakukan menggunakan Marshall Test.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap parameter Marshall stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient mengalami perubahan ketika proporsi slag nikel ditingkatkan. Stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar aspal 6% dengan variasi slag 0%, yaitu 1107,20 kg, sedangkan nilai flow tertinggi terjadi pada kadar aspal 5% dengan slag 0% sebesar 4,37 mm. Nilai VIM tertinggi dicapai pada kadar aspal 5% dengan slag 0% sebesar 5,79, sedangkan nilai VMA tertinggi terdapat pada kadar aspal 7% dengan slag 0% sebesar 18,30. Untuk parameter VFB, nilai tertinggi tercapai pada variasi slag 100% pada kadar aspal 7%, yaitu 85,29. Marshall Quotient tertinggi juga diperoleh pada kadar aspal 6% dengan slag 0%, yaitu 348,81 kg/mm. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi slag nikel menghasilkan perbedaan karakteristik campuran HRS-Base pada setiap parameter Marshall, dan proporsi slag yang lebih tinggi cenderung memberikan nilai parameter yang berbeda dibandingkan penggunaan agregat halus tanpa substitusi.

Kata kunci: Slag nikel, campuran laston HRS-BASE, Marshall Test.

© 2025 Penerbit Fakultas Teknik Unkhair. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Pada pekerjaan perkerasan lentur, kinerja campuran aspal sangat dipengaruhi oleh karakteristik agregat sebagai komponen dominan dalam struktur campuran. Agregat yang baik harus memenuhi persyaratan ketahanan aus, kekerasan, bentuk partikel, serta kemampuan interaksi permukaan dengan aspal untuk memastikan perkerasan mampu menanggung beban berulang kendaraan dan resistensi terhadap deformasi permanen. Kegagalan dalam pemilihan agregat sering menjadi penyebab munculnya rutting dan retak kelelahan pada lapisan Laston [1].

Di Indonesia, Laston (*Asphalt Concrete*) merupakan jenis lapis perkerasan yang paling banyak digunakan karena memiliki stabilitas struktural yang memadai. Namun, peningkatan beban lalu lintas, pengaruh temperatur tropis, serta ketidakonsistenan kualitas agregat alam menyebabkan kinerja lapisan aspal sering menurun sebelum umur rencana. Kondisi ini menuntut pencarian material alternatif yang lebih stabil dan berkelanjutan (*sustainable*) untuk meningkatkan ketahanan campuran beraspal [2]. Industri smelter nikel laterit di Maluku Utara (PT IWIP, PT Harita Group, PT Antam) menghasilkan limbah samping berupa nickel slag dalam jumlah besar. Sejak terbitnya PP No. 22 Tahun 2021, slag nikel secara hukum tidak lagi diklasifikasikan sebagai limbah B3, sehingga membuka peluang pemanfaatannya pada infrastruktur konstruksi [3].

Secara teknis, slag nikel menunjukkan karakteristik yang membuatnya berpotensi menjadi substitusi agregat halus atau kasar dalam campuran aspal, yaitu:

1. Tekstur permukaan kasar dan angular

Struktur mineral slag nikel didominasi silikat, olivin, dan oksida besi ($\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$), yang memberikan ketahanan abrasi lebih tinggi dibanding sebagian agregat alam. Dibuktikan oleh:

- a. Ahmedzade & Sengoz (2009) [4]: slag meningkatkan stabilitas Marshall dan ketahanan deformasi.

- b. Pasetto & Baldo (2012)[5]: slag baja dan nikel memberikan *rutting resistance* lebih baik dibanding agregat konvensional.
2. Tekstur permukaan kasar dan angular
Slag cenderung memiliki *angularity* dan *surface roughness* tinggi, meningkatkan ikatan mekanis dan interlocking antar-partikel. Manso et al. (2004) menyebut slag memberikan nilai *friction angle* lebih tinggi [6].
3. Densitas semu tinggi
Dapat meningkatkan kerapatan campuran dan mempengaruhi parameter volumetrik seperti VMA dan VIM. Choudhary & Kumar (2013) menunjukkan peningkatan densitas dan stabilitas pada AC menggunakan industrial slag [7].
4. Stabilitas terhadap suhu dan cuaca
Sifat mineral slag yang tahan terhadap perubahan temperatur memberikan keunggulan pada lingkungan tropis. Wang et al. (2019) melaporkan bahwa slag memiliki ketahanan terhadap *thermal cracking* dan aging.
5. Potensi keberlanjutan (*sustainability*) [8].
Pemanfaatan slag dapat mengurangi eksploitasi agregat alam serta menekan penumpukan limbah industri. Damanhuri (2022) dan Limbong et al. (2023) menyatakan bahwa pemanfaatan slag adalah bagian dari *strategi circular economy* sektor pertambangan [9][10].

Namun, meskipun memiliki keunggulan teknis, beberapa studi juga menunjukkan adanya tantangan seperti sebagian slag memiliki nilai penyerapan aspal lebih tinggi, kandungan fraksi halus tertentu berpotensi mempengaruhi *workability*, perbedaan komposisi kimia antar-smelter dapat menghasilkan kualitas slag yang tidak seragam. Oleh karena itu, pengujian empiris diperlukan untuk memastikan kelayakan teknis slag nikel sebagai substitusi agregat halus pada campuran HRS-Base.

2. METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini adalah metode eksperimental laboratorium dengan data primer yang dilakukan berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan di Laboratorium Jalan dan Aspal Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Khairun. Penelitian ini akan berlangsung selama 12 bulan dimulai dari bulan Januari tahun 2025 sampai dengan bulan Desember tahun 2025. Material yang digunakan terdiri dari agregat kasar dan halus yang digunakan berasal dari Desa Bori Kecamatan Bacan Timur Kabupaten Halmahera Selatan sedangkan material slag nikel berasal dari PT. Hijau Lestari Perkasa (HLP), Kecamatan Obi, Halmahera Selatan.

Penelitian ini menggunakan peralatan yang berada di laboratorium Jalan & Aspal Fakultas Teknik Universitas Khairun Ternate. Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Alat uji pemeriksaan aspal yang terdiri dari :
 - a. Alat uji penetrasi pada bitumen
 - b. Alat uji titik lembek
2. Alat uji berat jenis aspal
 - a. Satu set alat uji saringan (*sieve*) Standar ASTM dan mesin getarnya.
 - b. Oven dan pengatur suhu
 - c. Satu set Water bath
 - d. Satu set alat berat jenis
3. Alat pembuat sampel campuran aspal :
 - a. Satu set cetakan (mold) berbentuk silinder dengan diameter 101,6 mm, tinggi 75 mm.
 - b. Alat penumbuk (compactor) yang mempunyai permukaan tumbuk rata berbentuk silinder, dengan berat 4,54 kg (10 lbs), tinggi jatuh bebas 45,7 cm.
 - c. Satu set alat pengangkat briket (dongkrak hidrolis)
4. Satu set alat Marshall, terdiri dari :
 - a. Kepala penekan yang berbentuk lengkung (*Breaking Head*)
 - b. Cincin penguji berkapasitas 2500 kg dengan arloji tekan
 - c. Arloji penunjuk kelelahan
5. Alat penunjang :
 - a. Panci
 - b. Kompor
 - c. Sarung tangan
 - d. Sendok dan spatula

Pengujian di laboratorium terdiri dari:

1. Pengujian agregat
Bahan agregat yang akan diuji berupa agregat kasar, kasar sedang dan limbah Slag nikel (abu batu). Sebelum pembuatan benda uji, bahan – bahan tersebut diuji dengan mengacu kepada Standar Nasional Indonesia (SNI).

- a. Pengujian agregat kasar, pengujian analisa saringan, pengujian berat jenis dan penyerapan, pengujian kadar lumpur, serta pengujian abrasi dengan mesin los angeles.
 - b. Pengujian agregat halus dan slag nikel pengujian analisa saringan pengujian berat jenis dan penyerapan pengujian kadar lumpur
2. Pengujian Marshall
- Tahap lanjut adalah perencanaan campuran, berdasarkan gradasi masing-masing agregat akan di rancang komposisi dari masing-masing agregat sehingga menghasilkan gradasi gabungan yang memenuhi spesifikasi. Kemudian dari hasil uji *Marshall* akan diperoleh nilai stabilitas dan *flow* [11].

Tahap pembuatan benda uji atau briket beton aspal berdasarkan proporsi agregat dan variasi kadar aspal yang telah direncanakan. Benda uji yang akan dibuat sebanyak 75 buah, dimana masing-masing kadar aspal dibuat 3 buah benda uji. Untuk pembagian kadar aspal menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Pb} = (0.035 \times \% \text{CA}) + (0.045 \times \% \text{FA}) + (0.18 \times \% \text{FF}) + \text{K} \quad (1)$$

Keterangan :

Pb = Kadar aspal rencana (tengah/ideal), persen terhadap berat campuran

CA = Agregat kasar, persen agregat tertahan saringan no.4

FA = Agepat halus, persen lolos saringan no. 4 dan tertahan saringan no. 200

FF = Persen agregat Lolos saringan no. 200

K = Konstanta (Nilai K sekitar 1 – 2).

Adapun variasi campuran slag nikel dengan agregat kasar, agregat kasar sedang, dan abu batu menggunakan Aspal Pen 60/70, untuk pembuatan benda uji atau briket sebagai berikut:

Tabel 1. Jumlah Benda Uji Substitusi Slag Nikel

Kadar Aspal (%)	Slag Nikel					Jumlah Benda Uji
	0%	25%	50%	75%	100%	
Pb - 1	3	3	3	3	3	75
Pb - 0,5	3	3	3	3	3	
Pb	3	3	3	3	3	
Pb + 0,5	3	3	3	3	3	
Pb + 1	3	3	3	3	3	

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Agregat

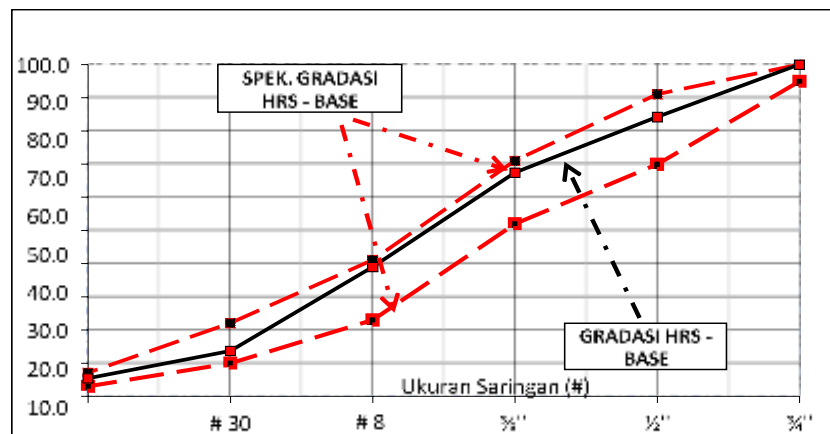
Pengujian karakteristik agregat dilakukan guna mengetahui kualitas atau memenuhi syarat atau standar yang ditentukan. Direktorat Jendral Bina Marga (Spesifikasi Umum 2018), Fraksi agregat kasar untuk rancangan campuran adalah yang tertahan ayakan No.4 (4,75 mm) yang dilakukan secara basah dan harus bersih, keras, awet dan bebas dari lempung atau bahan yang tidak dikehendaki lainnya dan memenuhi ketentuan yang diberikan sedangkan, Agregat halus dari sumber bahan manapun, harus terdiri dari pasir atau hasil pengayakan batu pecah dan terdiri dari bahan yang lolos ayakan No.4 (4,75 mm) [12]. Data hasil pemeriksaan agregat seperti pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil pemeriksaan agregat

No	Jenis Pemeriksaan	Hasil pemeriksaan Agregat					Spec.		
		Kasar	Sedang	Abu batu	Pasir	Slag nikel	Min	Max	Ket
1	Berat Jenis dan Penyerapan Agregat	Tabel berikut							
a	Berat Jenis Bulk	2.653	2.661	2.579	2.650	2.642	2,5		
b	Berat Jenis SSD	2.663	2.665	2.618	2.696	2.696	2,5		
c	Berat Jenis Semu	2.678	2.671	2.684	2.777	2.792	2,5		
d	Penyerapan Keausan dengan mesin los angeles	0.350 23.84	0.140	1.525	1.732	2.041		3 %	
2	Kadar lumpur dan lempung agregat	0.450	0.650	0.850	0.800	0,000		5%	
4	Indeks kepipihan	22.00						25 %	

Tabel 3. Hasil Analisa saringan

Ukuran saringan standar		Persentasi Lolos Saringan					Komposisi Campuran Agregat					Gradasi Gab.	Batas Spec.
		Agregat					Agregat						
ASTM	mm	Kasar (CA)	Ksr. Sdng (MA)	Hls Abu Batu	Hls Pasir	Slag Nikel	Kasar (CA)	Ksr. Sdng (MA)	Hls Abu Batu	Hls Pasir	Slag Nikel		
							23%	20%	33%	12%	12%	100%	
¾"	19,00	100	100	100	100	100	23,00	20,00	33,00	12,00	12,00	100	100
½"	12,50	31,34	100	100	100	100	7,21	20,00	33,00	12,00	12,00	82,21	90-100
⅜"	9,50	11,39	38,89	100	100	100	2,62	7,78	33,00	12,00	12,00	67,40	75-85
#8	2,36	6,10	0,32	53,32	79,59	86,38	1,40	0,06	17,60	9,55	10,37	38,96	50-72
#30	0,600	5,64	0,32	35,44	2,27	2,80	1,30	0,06	11,69	0,27	0,34	13,66	35-60
#200	0,075	2,94	0,24	13,91	0,13	0,40	0,86	0,05	4,59	0,02	0,05	5,38	6-10



Gambar 1. Gradasi Gabungan Analisa Saringan

Karakteristik Aspal

Pemeriksaan karakteristik aspal dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisik aspal yang digunakan, yang tentunya berkaitan dengan kinerja dari aspal itu sendiri sebagai bahan pengikat aspal yang digunakan dalam penelitian ini yaitu aspal minyak penetrasi 60/70, yang digunakan. Dari hasil pemeriksaan aspal penetrasi 60/70 yang di lakukan pada laboratorium jalan dan aspal bisa di lihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Aspal Pen 60/70

No	Pemeriksaan	Hasil		Rata - rata	Spesifikasi		Satuan	Keterangan
		Min	Max		Min	Max		
1	Penetrasi Aspal							
	a. Sebelum kehilangan berat	63,16	67,40	67,40	60	79	0,1 mm	Memenuhi
	b. Sesudah kehilangan berat	70,07	80,53	73,50	60	79	% semula	Memenuhi
2	Penurunan berat aspal	0,235	0,290	0,263	-	0,6	% berat	Memenuhi
3	Berat jenis aspal	0,859	1,453	1,156	1	-	gr/cc	Memenuhi
4	Titik lembek aspal	42,93	57,07	50,00	48	58	°C	Memenuhi

Karakteristik Slag Nikel

Pemeriksaan Karakteristik Slag Nikel dilakukan guna mengetahui sifat – sifat Slag Nikel sebagai bahan pengganti agregat halus, pemeriksaan yang dilakukan berupa pemeriksaan berat jenis dan penyerapan, Slag Nikel yang diambil berasal dari PT. Hijau Lestari Perkasa., yang berada di Kecamatan Obi, Halmahera Selatan. Sebagaimana terlihat pada tabel berikut.

Tabel 5. Hasil Pemeriksaan Analisa Saringan *Slag Nikel*

Ukuran Ayakan		Berat Tertahan	Analisa Saringan		
			Kumulatif Tertahan		
Menurut ASTM	(mm)	Tiap Ayakan	Berat Tertahan	Tertahan (%)	Lolos (%)
3/4"	19	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00
# 8	2.36	206.00	206.00	13.74	86.26
# 30	0.600	1259.00	1,465.00	97.73	2.27
# 200	0.075	32.00	1,497.00	99.87	0.13
Pan	0.000	2.00	1,499.00	100.00	0.00

Pemeriksaan Analisa Saringan terhadap bottom ash dapat dilihat bahwa berat tertahan tiap ayakan didominasi pada ukuran ayakan No. 8 dan No.30 yang berarti menunjukkan bahwa Bottom Ash memiliki ukuran dominan lolos saringan No.4 yang merupakan syarat digolongkannya sebagai material agregat halus dan dapat disubstitusi dengan agregat halus yang lain.

Komposisi Campuran HRS-Base

Perencanaan kadar aspal rencana dalam campuran memiliki perhitungan sesuai dengan rumus pada bab sebelumnya dalam perhitungan hanya mencari nilai kadar aspal rencana dengan empat fraksi penggabungan agregat dimana komposisi campurannya yaitu, Agregat Kasar 23%, kasar sedang 35%, Abu Batu 25% dan Slag Nikel 17%, perhitungan sebagai berikut:

$$PB = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%MA) + 0,18 (\%FF) + K$$

$$PB = 0,035 (46,38\%) + 0,045 (47,390\%) + 0,18 (6,233\%) + 1$$

$$PB = 5,8 \%, \text{ Maka dibulatkan } 6 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas dipakai nilai Pb = 6% maka kadar aspal rencana dapat dilihat pada tabel berikut dibawah ini:

Tabel 6. Kadar Aspal Rencana

-1,0	-0,5	Pb	0,5	1,0
5%	5,5%	6%	6,5%	7%

Pengujian *Marshall Test*

Pemeriksaan ini di maksudkan untuk ketahanan (Stabilitas) terhadap kelelahan plastis (*Flow*) dari campuran aspal Ketahanan (Stabilitas) adalah kemampuan suatu campuran aspal untuk menerima beban sampai terjadi beban plastis yang dinyatakan dalam kilogram atau *pound* kelelahan plastis (*Flow*) adalah keadaan perubahan bentuk suatu campuran aspal yang terjadi akibat suatu beban sampai batas runtuh, yang dinyatakan dalam mm atau 0,1. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi slag nikel sebagai substitusi agregat halus pada karakteristik campuran aspal beton (HRS-BASE). Variasi perbandingan slag nikel 0%, 25%, 50%, 57%, 100%, dengan penetrasi aspal 60/70 sebagai bahan pengikat dengan tidak mengabaikan kriteria lainnya yang di hasilkan dalam pengujian *marshall*.

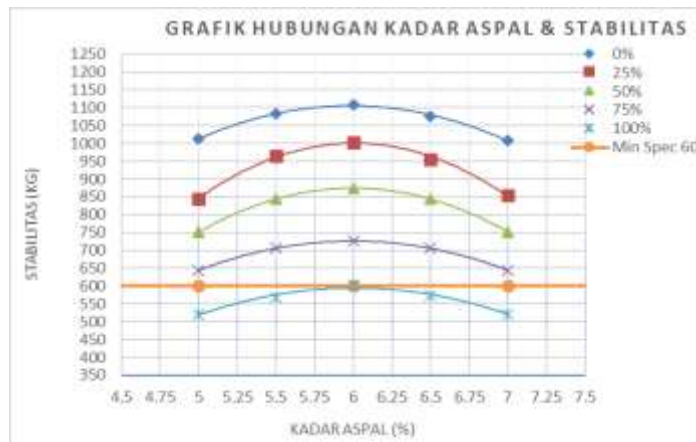
Berdasarkan data uji Marshall, kecenderungan yang muncul adalah stabilitas tertinggi pada 0% slag, lalu menurun ketika proporsi slag nikel meningkat. Ada beberapa mekanisme teknis yang masuk akal. Tekstur permukaan slag nikel lebih halus dan kurang angular, slag nikel umumnya memiliki permukaan lebih glassy, sudut butiran kurang tajam, tingkat angularitas lebih rendah daripada agregat alami. Konsekuensi teknisnya adalah interlocking antarbutir melemah, gaya geser internal menurun, kapasitas menahan beban (stabilitas) ikut turun. Hal ini sejalan dengan pola pada data Anda di mana variasi 0% slag menghasilkan nilai stabilitas tertinggi (1107,20 kg).

Uji Stabilitas

Stabilitas memiliki nilai minimal yaitu 800 kg, dari grafik hubungan antara stabilitas dan kadar aspal yang menggunakan aspal penetrasi 60/70, hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan variasi substitusi agregat halus (pasir) dengan slag nikel adalah 0%, 25%, 50%, 75%, 100% sebagaimana dipaparkan pada tabel berikut.

Tabel 7. Hasil Stabilitas pada Marshall Test

Kadar Aspal	Stabilitas (Kg)				
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN100%
5%	1012.36	843.63	751.60	644.23	521.52
5,5%	1083.94	966.34	843.63	705.58	567.53
6%	1107.20	1002.63	874.31	726.04	603.33
6,5%	1076.68	955.29	843.63	705.58	572.65
7%	1008.07	855.01	751.60	644.23	521.52



Gambar 2. Hubungan Stabilitas dan Kadar Aspal

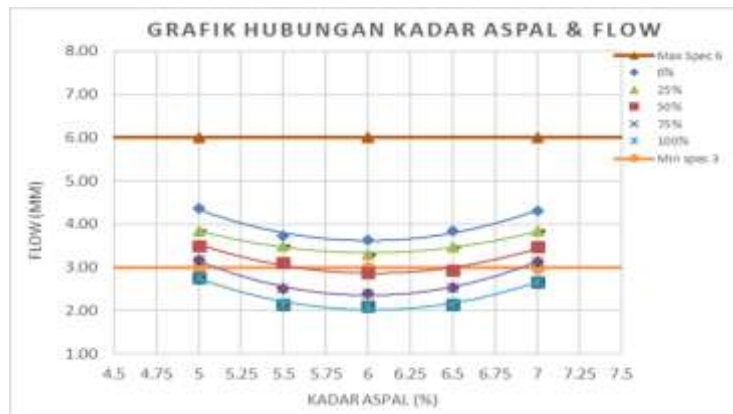
Nilai stabilitas semua kadar aspal dan variasi memenuhi minimal spesifikasi yaitu 600 kg. Nilai stabilitas di kadar aspal 6% cenderung lebih tinggi di dibandingkan dengan kadar aspal yang lain dan untuk variasi yang paling tinggi yaitu Nilai 1107.20 berada di kadar aspal 6% dengan variasi 0%. Grafik stabilitas menunjukkan bahwa nilai stabilitas tertinggi berada pada 0% slag, kemudian mengalami penurunan pada setiap penambahan proporsi slag nikel. Polanya konsisten menurun, sehingga semakin besar kandungan slag dalam campuran, semakin kecil nilai stabilitas yang diperoleh.

3.3.1 Flow

Flow atau kelelahan plastis merupakan besaran deformasi yang terjadi sebelum keruntuhan faktor-faktor mempengaruhi tinggi rendahnya nilai *flow* antara lain komposisi agregat dan kadar aspal dalam campuran, *Flow* memiliki nilai standar minimal 3 mm dan Max 6 mm.

Tabel 8. Standar nilai kelelahan plastis

Kadar Aspal	FLOW (Kg)				
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN 100%
5%	4.37	3.83	3.50	3.17	2.77
5,5%	3.73	3.50	3.10	2.50	2.13
6%	3.63	3.30	2.87	2.40	2.10
6,5%	3.83	3.47	2.93	2.53	2.13
7%	4.30	3.83	3.47	3.13	2.67



Gambar 3. Hubungan *Flow* dan Kadar Aspal

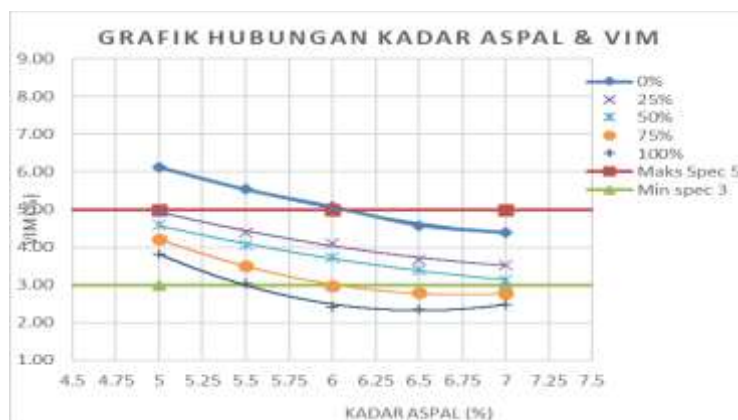
Grafik di atas menunjukkan bahwa semua kadar aspal dan variasi *Slag nikel* memenuhi minimal spesifikasi yaitu 3 mm dan maksimum 6 mm. Pada variasi substitusi 0% *slag nikel* (normal) lebih tinggi dibandingkan dengan variasi substitusi lainnya untuk setiap campuran dan di kadar aspal 5% yang paling tinggi nilainya 4.37. Grafik *flow* memperlihatkan bahwa nilai *flow* tertinggi juga terjadi pada 0% slag, setelah itu nilai *flow* cenderung menurun seiring bertambahnya kadar slag. Penurunan *flow* ini menunjukkan bahwa campuran menjadi kurang plastis ketika proporsi slag nikel meningkat.

Void in Mix (VIM)

VIM merupakan volume pori yang masih tersisa setelah campuran aspal beton dipadatkan. Besarnya nilai VIM dipengaruhi oleh gradasi dan jumlah aspal. Nilai VIM yang terlalu besar menyebabkan kurangnya kekedapan air sehingga mempercepat penuaan aspal dan menurunkan sifat durabilitas aspal beton. VIM memiliki minimal nilai 3 dan maksimal nilai yaitu 5. Hasil VIM dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 9. Hasil VIM pada *Marshall test*

Kadar Aspal	VIM				
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN 100%
5%	5.79	4.94	4.59	4.22	3.81
5,5%	5.40	4.40	4.05	3.51	3.04
6%	5.01	4.11	3.72	2.98	2.43
6,5%	4.58	3.66	3.39	2.80	2.35
7%	4.38	3.53	3.13	2.77	2.48



Gambar 4. Hubungan VIM dan Kadar Aspal

Berdasarkan grafik VIM diatas dapat dilihat hampir semua kadar aspal dan variasi memenuhi spesifikasi, hanya pada kadar aspal 5% 7% dengan variasi *slag nikel* 0% yang memenuhi maksimal spesifikasi dengan nilai

VIM tertinggi yaitu 5,79. Grafik VIM menunjukkan bahwa nilai VIM tertinggi terdapat pada 0% slag, kemudian berangsur menurun pada variasi slag berikutnya. Pola penurunan ini menandakan bahwa semakin tinggi kadar slag, rongga udara dalam campuran semakin kecil.

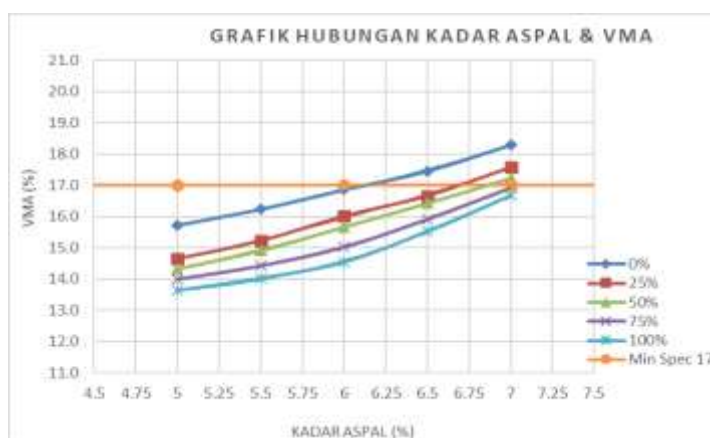
Void in the Mineral Agregate (VMA)

VMA adalah volume pori didalam aspal beton padat jika selimut aspal ditiadakan. Tidak termasuk didalam VMA volume didalam masing-masing butir agregat. Nilai VMA akan meningkat jika selimut aspal lebih tebal atau agregat yang digunakan bergradasi terbuka. VMA memiliki standar minimal nilai yaitu 17.

Tabel 10. Hasil VMA pada *Marshall test*

Kadar Aspal	VMA				
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN 100%
5%	15.41	14.64	14.33	14.00	13.62
5,5%	16.11	15.22	14.91	14.43	14.02
6%	16.80	16.01	15.67	15.02	14.54
6,5%	17.45	16.66	16.42	15.92	15.53
7%	18.30	17.57	17.22	16.92	16.67

Berdasarkan grafik VMA dapat dilihat hampir semua kadar aspal dan variasi tidak memenuhi spesifikasi, hanya pada kadar aspal 6% dengan variasi *slag nikel* 0%, 25%,50% yang memenuhi maksimal spesifikasi dengan nilai VMA tertinggi yaitu 18,30. Pada grafik VMA, nilai tertinggi muncul pada 0% slag, kemudian mengalami penurunan saat proporsi slag meningkat. Hal ini menggambarkan bahwa volume rongga antarbutir agregat berkurang ketika slag menggantikan agregat halus.



Gambar 5. Hubungan VMA dengan Kadar aspal

Void Filled Bitumen (VFB)

VFB merupakan volume pori aspal beton padat yang terisi oleh aspal atau volume selimut aspal, biasa juga disebut rongga terisi aspal. Batas minimal nilai dari VFB adalah 68, hasil penelitian menunjukan hal-hal sebagai berikut:

Tabel 11. Hasil VFB pada *Marshall Test*

Kadar Aspal	VFB				
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN 100%
5%	62.67	66.96	68.16	69.91	72.98
5,5%	67.19	71.19	73.09	75.89	78.40
6%	71.45	74.78	76.37	80.48	83.34
6,5%	74.09	78.07	79.45	82.40	85.08
7%	76.51	80.11	81.89	83.69	85.29



Gambar 6. Hubungan VFB dan Kadar Aspal

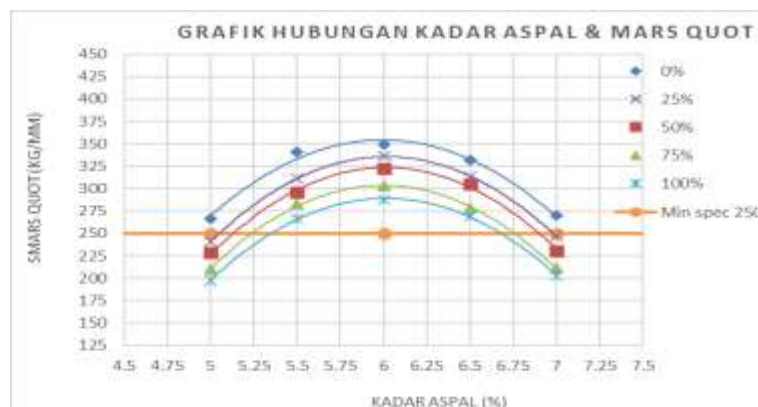
Berdasarkan grafik 6 tentang VFB dan kadar aspal di atas didapatkan bahwa pada kadar aspal 5%, 5,5% 6%, 6,5% 7% dengan semua variasi *slag nikel* dapat memenuhi minimal spesifikasi VFB 68, dengan semua variasi *slag nikel* dapat memenuhi minimal spesifikasi. Nilai tertinggi VFB didapat dari kadar aspal 7% dan *slag nikel* 100 dengan nilai 85,29. Grafik VFB menunjukkan pola kebalikan dari VIM dan VMA. Nilai VFB meningkat seiring bertambahnya kadar slag, dan mencapai nilai tertinggi pada 100% slag. Ini menunjukkan bahwa semakin banyak slag digunakan, semakin besar bagian rongga yang terisi aspal.

Marshall Quotient (MQ)

Marshall quotient merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dan *flow* artinya nilai *marshall quotient* sangat ditentukan nilai stabilitas dan *flow* dalam campuran. Nilai MQ terlalu tinggi menandakan campuran yang terlalu kaku. MQ memiliki standar minimal yaitu 250 kg/mm. Nilai MQ penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 12. Hasil MQ pada *Marshall test*

Kadar Aspal	MQ				
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN 100%
5%	266.75	240.82	228.37	209.77	197.70
5,5%	341.12	311.29	296.05	282.62	266.59
6%	348.81	336.16	322.60	303.05	287.51
6,5%	332.12	313.15	305.16	278.62	269.24
7%	269.60	246.77	230.55	210.95	202.81



Gambar 7. Hubungan MQ dan Kadar Aspal

Berdasarkan grafik MQ dan kadar aspal diatas diperoleh nilai MQ semua kadar aspal dan variasi memenuhi minimal spesifikasi yaitu 250 kg. Nilai MQ di kadar aspal 6% cenderung lebih tinggi di bandingkan dengan kadar aspal yang lain dan untuk variasi yang paling tinggi yaitu 348.81 berada di variasi 0 %.dengan kadar aspal 6%. Grafik *Marshall Quotient* (MQ) menampilkan nilai tertinggi pada 0% slag, kemudian mengalami penurunan pada variasi slag berikutnya. MQ yang menurun menandakan bahwa kekakuan campuran berkurang ketika proporsi slag nikel meningkat.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi slag nikel sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik campuran aspal beton HRS-Base melalui serangkaian pengujian Marshall. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap parameter Marshall stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient mengalami perubahan ketika proporsi slag nikel ditingkatkan. Stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar aspal 6% dengan variasi slag 0%, yaitu 1107,20 kg, sedangkan nilai flow tertinggi terjadi pada kadar aspal 5% dengan slag 0% sebesar 4,37 mm. Nilai VIM tertinggi dicapai pada kadar aspal 5% dengan slag 0% sebesar 5,79, sedangkan nilai VMA tertinggi terdapat pada kadar aspal 7% dengan slag 0% sebesar 18,30. Untuk parameter VFB, nilai tertinggi tercapai pada variasi slag 100% pada kadar aspal 7%, yaitu 85,29. Marshall Quotient tertinggi juga diperoleh pada kadar aspal 6% dengan slag 0%, yaitu 348,81 kg/mm. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi slag nikel menghasilkan perbedaan karakteristik campuran HRS-Base pada setiap parameter Marshall, dan proporsi slag yang lebih tinggi cenderung memberikan nilai parameter yang berbeda dibandingkan penggunaan agregat halus tanpa substitusi.

REFERENSI

- [1] Huang, Y. H. (2012). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson.
- [2] Sukirman, S. (2003). *Perkerasan lentur jalan raya*. Nova.
- [3] Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Sekretariat Negara.
- [4] Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag as an aggregate in hot-mix asphalt. *Materials & Design*, 30(8), 403–409.
- [5] Pasetto, M., & Baldo, N. (2012). Recycling of steel slag and nickel slag in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 495–507.*
- [6] Manso, J. M., Polanco, J. A., Losáñez, M., & Gonzalez, J. J. (2004). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 235–241*.
- [7] Choudhary, R., & Kumar, A. (2013). Performance of bituminous mixes containing industrial waste. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 350–359.
- [8] Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., & van de Ven, M. (2019). Warm mix asphalt with steel slag. *Journal of Cleaner Production*, 222, 1020–1030.*
- [9] Damanhuri, E. (2010). *Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)*(Diktat Kul). Bandung: Institusi Teknologi Bandung
- [10] Limbong, D., et al. (2023). Nickel slag reuse in circular economy. *Journal of Sustainable Mining*, 22(1), 45–52.*
- [11] Angka, K. A. B. (2017). Slag nikel sebagai bahan substitusi pada karakteristik campuran. In *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M) 2017* (pp. 89–94). Makassar.
- [12] Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Standar Nasional Indonesia (SNI ASTM): Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar*. BSN.