

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Sifat Aspal

Pengujian sifat aspal dilakukan untuk memastikan bahwa bahan pengikat memiliki karakteristik dasar yang layak digunakan pada campuran. Pengujian yang tersedia dalam workbook meliputi penetrasi, titik lembek, berat jenis aspal, dan daktilitas.

4.1.1 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal

Tabel 4. 1 Hasil pengujian penetrasi Aspal

Penetrasi pada suhu 25° C	Penetrasi	
	I	II
100 gram, 5 detik		
Pengamatan 1	65	64
Pengamatan 2	64	62
Pengamatan 3	62	65
Pengamatan 4	61	60
Pengamatan 5	62	61
Rerata	62,8	62,4
Rata - Rata	62,6	

Berdasarkan tabel 4.1 hasil pengujian penetrasi, diperoleh nilai rata-rata penetrasi aspal sebesar 62,6. Nilai ini berada dalam rentang aspal penetrasi 60/70, sehingga aspal yang digunakan termasuk dalam kategori aspal keras yang masih sesuai untuk campuran beraspal panas. Secara teknis, nilai penetrasi menunjukkan tingkat kekerasan atau konsistensi aspal. Semakin besar nilai penetrasi, maka aspal semakin lunak, sedangkan semakin kecil nilai penetrasi, maka aspal semakin keras. Nilai penetrasi 62,6 menunjukkan bahwa aspal tidak terlalu keras dan tidak terlalu lunak, sehingga masih mampu memberikan keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas pada campuran AC-WC.

Kondisi ini penting karena AC-WC merupakan lapisan aus yang menerima beban lalu lintas secara langsung sekaligus terpapar perubahan suhu dan air. Aspal yang terlalu keras dapat menyebabkan campuran menjadi getas dan mudah retak, sedangkan aspal yang terlalu lunak dapat meningkatkan risiko deformasi permanen seperti alur atau rutting. Oleh karena itu, nilai penetrasi yang berada pada rentang 60/70 menunjukkan

bahwa bahan pengikat memiliki karakteristik awal yang layak untuk digunakan dalam campuran AC-WC. Hal ini sesuai dengan fungsi penetrasi sebagai indikator konsistensi dan kekerasan aspal dalam pengujian sifat dasar bahan pengikat (Badan Standarnisasi Nasional, 2011c; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.1.2 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal

No	Suhu Yang Diamati		Waktu (menit)		SuhuTitik Lembek (°C)	
	°C	°F	I	II	I	II
1	5	41	0:00:00	0:00:00	55	57
2	10	50	5:10:00	5:10:00		
3	15	59	7:55:00	7:55:00		
4	20	68	10:01:00	10:01:00		
5	25	77	12:16:00	12:16:00		
6	30	86	14:42:00	14:42:00		
7	35	95	17:05:00	17:05:00		
8	40	104	18:48:00	18:48:00		
9	45	113	20:57:00	20:57:00		
10	50	122	23:04:00	23:04:00		
11	55	131	25:06:00	25:06:00		
12	55	132,8	25:17:00	25:17:00		
13	57	134,6	25:45:00	25:45:00		
Rata-Rata Titik Lembek (°C)					56	

Berdasarkan Tabel 4.2 hasil pengujian titik lembek, diperoleh nilai rata-rata sebesar 56°C. Nilai ini menunjukkan bahwa aspal memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap perubahan temperatur tinggi. Titik lembek menggambarkan suhu saat aspal mulai mengalami pelunakan akibat pemanasan. Semakin tinggi nilai titik lembek, maka semakin baik kemampuan aspal dalam mempertahankan konsistensi dan tidak mudah melunak pada kondisi temperatur tinggi.

Secara teknis, nilai titik lembek yang relatif tinggi bermanfaat untuk meningkatkan stabilitas campuran, terutama pada lapisan AC-WC yang berada di permukaan perkerasan dan langsung menerima panas matahari serta beban kendaraan. Jika titik lembek terlalu rendah, aspal dapat menjadi terlalu lunak saat suhu lapangan meningkat, sehingga campuran berpotensi mengalami bleeding, deformasi plastis, atau rutting. Dengan nilai titik lembek 56°C, aspal yang digunakan memiliki ketahanan termal

yang cukup baik untuk mendukung kinerja campuran beraspal panas. Hal ini sejalan dengan konsep bahwa titik lembek merupakan parameter yang menunjukkan ketahanan aspal terhadap pengaruh temperatur tinggi (Badan Standarnisasi Nasional, 2011b; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.1.3 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal

Daktilitas Pada Suhu 25°C 5 cm/menit	Pembacaan Pengukuran Pada Alat		Satuan
	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
Pengamatan 1	43	88	cm
Pengamatan 2	98	102,5	cm
Rata-Rata	70,5	95,25	cm

Berdasarkan Tabel 4. 3 Hasil pengujian daktilitas menunjukkan nilai rata-rata pada benda uji 1 sebesar 70,5 cm dan benda uji 2 sebesar 95,25 cm, sehingga diperoleh rerata gabungan sebesar 82,875 cm. Nilai daktilitas menunjukkan kemampuan aspal untuk mengalami pemanjangan sebelum putus. Semakin tinggi nilai daktilitas, maka semakin baik kemampuan aspal dalam menahan deformasi tarik dan semakin besar potensi aspal untuk menahan retak pada campuran perkerasan.

Nilai daktilitas yang diperoleh menunjukkan bahwa aspal masih memiliki kemampuan regangan, tetapi nilainya perlu dicermati karena tidak mencapai 100 cm apabila mengacu pada batas daktilitas yang umum digunakan untuk menunjukkan kelenturan aspal yang baik. Secara teknis, nilai daktilitas yang relatif rendah dapat disebabkan oleh kondisi aspal yang cenderung lebih kaku, pengaruh pemanasan saat persiapan sampel, atau kemungkinan penurunan sifat elastis selama proses pengujian. Hal ini penting karena campuran AC-WC memerlukan aspal yang tidak hanya kuat menahan beban, tetapi juga cukup lentur dalam menerima deformasi akibat lalu lintas berulang. Oleh karena itu, hasil daktilitas ini menjadi salah satu alasan mengapa penambahan NRL diperlukan, karena NRL berpotensi meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas bahan pengikat (Badan Standarnisasi Nasional, 2011a; Suwanto et al., 2023; Wen et al., 2017b).

4.1.4 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen

Pengujian		1	2	Satuan
Berat Picnometer Kosong	A	43,10	42,80	gram
Berat Picnometer + Air	B	68,50	68,60	gram
Berat Picnometer + Aspal	C	58,40	57,40	gram
Berat Picnometer + Air + Aspal	D	69,20	68,90	gram
Berat Aspal	C - A	15,30	14,60	gram
Isi Aspal	(B - A) - (D - C)	14,60	14,30	gram
Berat Jenis Aspal	(C - A)	1,05	1,02	gram
	(B - A) - (D - C)			
Berat Jenis Aspal Rerata	(Uji 1 + Uji 2)	1,03		gram
	2			

Berdasarkan Tabel 4. 4 hasil pengujian berat jenis bitumen, diperoleh nilai berat jenis rata-rata sebesar 1,034. Nilai ini menunjukkan bahwa berat jenis aspal lebih besar dari air dan masih berada pada kisaran yang umum untuk aspal keras. Berat jenis aspal diperlukan dalam perhitungan volumetrik campuran, terutama untuk menentukan hubungan antara volume aspal, rongga udara, rongga dalam agregat, dan kadar aspal efektif.

Secara teknis, berat jenis bitumen yang sesuai menunjukkan bahwa aspal memiliki kepadatan material yang baik dan dapat digunakan dalam perhitungan campuran Marshall. Apabila berat jenis aspal tidak akurat, maka perhitungan volumetrik seperti VIM, VMA, dan VFB juga dapat terpengaruh. Hal ini karena parameter volumetrik campuran sangat bergantung pada nilai berat jenis masing-masing material penyusun. Dengan demikian, nilai berat jenis bitumen sebesar 1,034 dapat digunakan sebagai dasar perencanaan campuran AC-WC berbasis RAP secara lebih tepat (ASTM, 2021; Badan Standardisasi Nasional, 2011a; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

Berat jenis dan penyerapan agregat digunakan dalam perhitungan volumetrik campuran, terutama untuk memperoleh nilai berat jenis bulk agregat (G_{sb}), berat jenis semu (G_{sa}), dan parameter rongga pada pengujian Marshall. Workbook memuat dua sheet berat jenis agregat.

4.2.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Material	Jenis	BJ Bulk (gram)	BJ SSD (gram)	BJ Semu (gram)	Penyerapan (%)
Agregat 3/4	Kasar	2,4372	2,5321	2,505	3,897
Agregat 1/2	Kasar	2,7117	2,7744	2,42	2,308
RAP >9,5	Kasar RAP	2,4027	2,4424	2,5023	1,652
RAP 9,5-4	Kasar RAP	2,7374	2,7972	2,9149	2,161

Berdasarkan Tabel 4. 5 dan hasil pengujian, agregat kasar 3/4 memiliki nilai berat jenis bulk sebesar 2,4372, berat jenis SSD sebesar 2,5321, dan berat jenis semu sebesar 2,505, dengan nilai penyerapan sebesar 3,897%. Nilai ini menunjukkan bahwa agregat 3/4 memiliki kemampuan menyerap air yang relatif lebih tinggi dibandingkan material lainnya.

Pada agregat kasar 1/2, diperoleh nilai berat jenis bulk sebesar 2,7117, berat jenis SSD sebesar 2,7744, dan berat jenis semu sebesar 2,42, sedangkan nilai penyerapan sebesar 2,308%. Hasil ini menunjukkan bahwa agregat 1/2 memiliki berat jenis yang cukup tinggi dengan tingkat penyerapan yang lebih rendah dibandingkan agregat 3/4.

Untuk material RAP >9,5, hasil pengujian menunjukkan nilai berat jenis bulk sebesar 2,4027, berat jenis SSD sebesar 2,4424, dan berat jenis semu sebesar 2,5023, dengan nilai penyerapan sebesar 1,652%. Dari data tersebut terlihat bahwa material RAP >9,5 memiliki nilai penyerapan paling rendah, sehingga dapat dikatakan memiliki daya serap air yang lebih kecil dibandingkan material lainnya.

Sementara itu, pada material RAP 9,5–4, diperoleh nilai berat jenis bulk sebesar 2,7374, berat jenis SSD sebesar 2,7972, dan berat jenis semu sebesar 2,9149, dengan nilai penyerapan sebesar 2,161%. Nilai ini menunjukkan bahwa RAP 9,5–4 memiliki berat jenis paling tinggi di antara seluruh material yang diuji, sedangkan nilai penyerapannya masih berada pada tingkat sedang.

Agregat 3/4 memiliki nilai penyerapan paling tinggi dibandingkan agregat kasar lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh tekstur permukaan yang lebih kasar, porositas lebih besar, atau kondisi batuan yang lebih terbuka terhadap masuknya air. Dalam campuran aspal, agregat dengan penyerapan tinggi dapat meningkatkan kebutuhan aspal efektif karena sebagian aspal berpotensi terserap ke dalam pori agregat. Sebaliknya, material RAP >9,5 memiliki penyerapan lebih rendah karena permukaan agregat masih terselimuti oleh aspal lama, sehingga pori agregat tidak sepenuhnya terbuka. Kondisi ini menjelaskan mengapa RAP dapat menyumbang aspal lama dalam campuran, tetapi juga perlu dikontrol karena aspal lama pada RAP telah mengalami penuaan. Karakteristik berat jenis dan penyerapan agregat sangat berpengaruh terhadap perhitungan volumetrik campuran, terutama VIM, VMA, dan VFB (ASTM, 2025a; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.2.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Material	Jenis	BJ Bulk (gram)	BJ SSD (gram)	BJ Semu (gram)	Penyerapan (%)
Pasir lolos #4	Halus	2,7338	2,9686	2,605	8,581
Abu batu lolos #4	Halus	2,7582	2,8821	2,54	4,494
RAP lolos #4	Halus RAP	2,43	2,208	2,2949	3,097

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus, diperoleh bahwa material pasir lolos #4 memiliki nilai BJ bulk sebesar 2,7338, BJ SSD sebesar 2,9686, dan BJ semu sebesar 2,605, dengan nilai penyerapan sebesar 8,581%. Nilai penyerapan tersebut merupakan yang paling tinggi dibandingkan material lainnya, sehingga menunjukkan bahwa pasir lolos #4 memiliki kemampuan menyerap air yang cukup besar.

Pada material abu batu lolos #4, diperoleh nilai BJ bulk sebesar 2,7582, BJ SSD sebesar 2,8821, dan BJ semu sebesar 2,54, dengan nilai penyerapan sebesar 4,494%. Nilai ini menunjukkan bahwa abu batu memiliki berat jenis yang cukup tinggi dengan tingkat penyerapan yang lebih rendah dibandingkan pasir lolos #4.

Material RAP lolos #4 memiliki nilai penyerapan yang lebih rendah dibandingkan beberapa agregat halus baru. Hal ini kemungkinan terjadi karena agregat RAP masih diselimuti aspal lama, sehingga daya serap airnya lebih kecil. Namun, aspal lama pada RAP memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan aspal baru karena telah mengalami aging. Binder RAP yang telah menua cenderung lebih keras dan kaku, sehingga meskipun penyerapan airnya rendah, kemampuan adhesi dan fleksibilitasnya tetap perlu diperbaiki. Oleh karena itu, penggunaan NRL dalam penelitian ini menjadi relevan untuk membantu meningkatkan daya ikat dan elastisitas campuran berbasis RAP (Costa et al., 2024; Pasetto et al., 2021; Sepriyanna et al., 2025).

4.3 Hasil Ekstraksi RAP dan Estimasi Aspal Baru

Pengujian ekstraksi RAP dilakukan untuk mengetahui kandungan aspal lama yang masih terdapat pada material RAP. Hasil ekstraksi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung estimasi kebutuhan aspal baru pada campuran agar kadar aspal total tetap sesuai dengan KAO yang direncanakan.

4.3.1 Hasil Ekstraksi RAP

Dari hasil perhitungan rumus 3.12; 3.13; 3.14 dan 3.15, diperoleh kandungan aspal yang berasal dari RAP sebesar 1,26%. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian kebutuhan aspal dalam campuran telah dipenuhi oleh aspal lama yang masih terkandung di dalam material RAP. Dengan demikian, penggunaan RAP dapat mengurangi kebutuhan aspal baru pada campuran.

Kandungan aspal RAP ini perlu diperhitungkan dalam penentuan kadar aspal tambahan, agar jumlah aspal total dalam campuran tetap sesuai dengan kadar aspal optimum yang telah direncanakan. Apabila KAO campuran konvensional sebesar 5,9%, maka kontribusi aspal dari RAP sebesar 1,26% dapat digunakan sebagai dasar untuk menyesuaikan kebutuhan aspal baru.

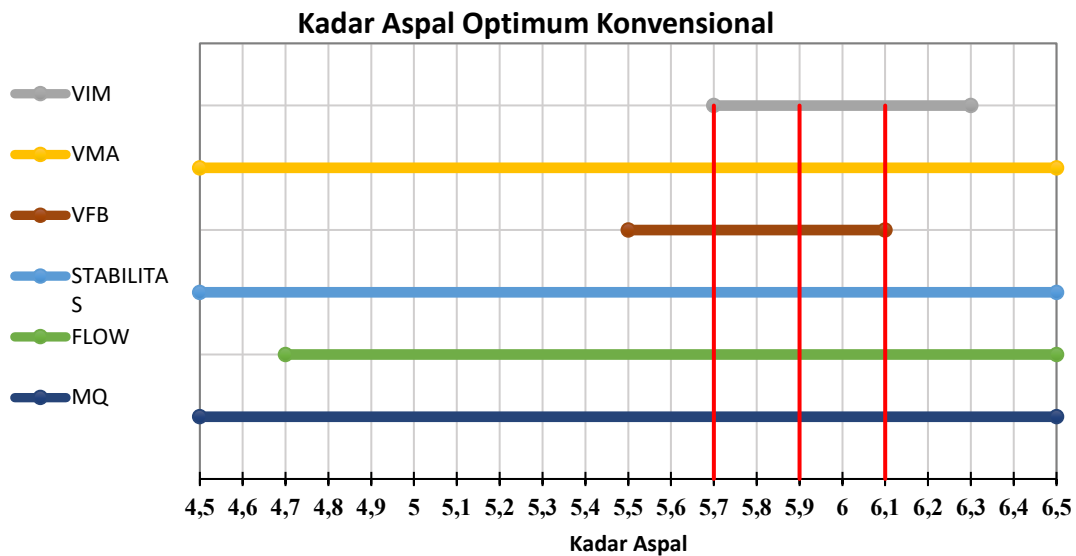
Secara teknis, kandungan aspal lama pada RAP menjadi keuntungan karena dapat mengurangi kebutuhan aspal baru. Akan tetapi, aspal lama pada RAP tidak dapat dianggap memiliki sifat yang sama dengan aspal baru karena telah mengalami penuaan akibat oksidasi, perubahan temperatur, dan beban lalu lintas selama masa layanan. Proses

penuaan menyebabkan binder menjadi lebih keras, lebih kaku, dan kehilangan sebagian sifat elastisnya. Oleh karena itu, meskipun RAP memberikan kontribusi terhadap kadar aspal total, kualitas binder RAP tetap perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi fleksibilitas, durabilitas, dan ketahanan campuran terhadap retak maupun ravelling (Costa et al., 2024; Pasetto et al., 2021; Podungge et al., 2022).

4.3.2 Estimasi Aspal Baru

Berdasarkan hasil perhitungan kandungan aspal dari material RAP pada tabel sebelumnya, diperoleh bahwa kandungan aspal RAP dalam campuran adalah sebesar 1,26%. Nilai tersebut merupakan kontribusi aspal lama yang berasal dari material RAP terhadap total kebutuhan aspal dalam campuran.

Berdasarkan hasil analisis Marshall campuran aspal konvensional, diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 5,9%. Nilai ini digunakan sebagai acuan kebutuhan total aspal dalam campuran AC-WC. Pada campuran yang menggunakan RAP 30%, sebagian kebutuhan aspal telah dipenuhi oleh aspal lama yang masih melekat pada material RAP. Hasil pengujian ekstraksi menunjukkan bahwa RAP mengandung aspal sebesar 4,20%, sehingga kontribusi aspal RAP dalam campuran sebesar 1,26% ($30\% \times 4,20\%$). Oleh karena itu, kebutuhan aspal baru tidak lagi sebesar 5,9%, melainkan dikurangi dengan kontribusi aspal dari RAP. Dengan demikian, kadar aspal baru yang perlu ditambahkan 4,64% untuk mencapai kebutuhan total aspal yang setara dengan KAO campuran konvensional, yaitu 5,9%.



Gambar 4. 1 KAO Aspal Konvensional

Nilai aspal baru tersebut diperoleh dari selisih antara KAO aspal konvensional dengan kandungan aspal yang berasal dari RAP, yaitu:

Tabel 4. 7 Estimasi Aspal Baru

ESTIMASI ASPAL BARU		
KANDUNGAN RAP (%)	KAO (%)	ASPAL BARU (%)
1,26%	5,9%	4,64%

Berdasarkan Tabel 4. 7 menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran dapat mengurangi kebutuhan aspal baru. Dengan adanya kandungan aspal lama pada material RAP, sebagian kebutuhan bahan pengikat sudah terpenuhi, sehingga penambahan aspal baru menjadi lebih rendah dibandingkan campuran tanpa RAP.

Secara teknik perkerasan, pengurangan aspal baru harus dilakukan secara hati-hati. Jika kontribusi aspal RAP tidak diperhitungkan, campuran dapat mengalami kelebihan kadar aspal yang berpotensi menyebabkan bleeding, flow tinggi, dan deformasi plastis. Sebaliknya, jika aspal RAP terlalu dianggap aktif seluruhnya, campuran dapat kekurangan aspal efektif karena sebagian binder RAP sudah tua dan tidak sepenuhnya mampu berinteraksi dengan agregat baru. Oleh karena itu, estimasi aspal baru sebesar 4,64% menjadi penting agar kadar aspal total tetap mendekati kebutuhan optimum dan

campuran tetap memiliki keseimbangan antara stabilitas, rongga udara, dan durabilitas (Costa et al., 2024; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.4 Analisis Gradasi dan Komposisi Job Mix Formula 30%

Analisis gradasi dan komposisi Job Mix Formula (JMF) dilakukan untuk menentukan susunan material agregat yang digunakan dalam campuran aspal, sehingga diperoleh gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi AC-WC. Pada penelitian ini, campuran direncanakan dengan penambahan material RAP sebesar 30% dari total agregat, sedangkan sisanya sebesar 70% berasal dari agregat baru.

Komposisi agregat baru terdiri dari agregat 3/4 sebesar 20%, agregat 1/2 sebesar 15%, pasir No. 4 sebesar 10%, dan abu batu No. 4 sebesar 25%. Sementara itu, komposisi RAP sebesar 30% dibagi menjadi tiga fraksi, yaitu RAP >9,5 sebesar 7%, RAP 9,5–4 sebesar 10%, dan RAP <4 sebesar 13%. Pembagian fraksi RAP ini dilakukan agar material RAP dapat tercampur secara merata dengan agregat baru dan menghasilkan gradasi gabungan yang memenuhi batas spesifikasi.

Dengan penggunaan 30% RAP, material hasil daur ulang perkerasan lama dimanfaatkan sebagai bagian dari campuran agregat sekaligus sebagai sumber aspal lama yang masih terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, dalam penyusunan JMF, penggunaan RAP tidak hanya diperhitungkan dari sisi gradasi agregat, tetapi juga dari kandungan aspal yang terdapat pada material RAP. Hal ini penting agar kebutuhan aspal baru dapat disesuaikan dan kadar aspal total dalam campuran tetap sesuai dengan kadar aspal optimum yang direncanakan.

Berdasarkan hasil analisis, gradasi yang terlalu kasar dapat menghasilkan rongga udara yang besar sehingga campuran lebih mudah dimasuki air dan udara. Kondisi tersebut dapat mempercepat oksidasi binder dan meningkatkan risiko ravelling. Sebaliknya, gradasi yang terlalu halus dapat menyebabkan campuran terlalu rapat, menurunkan rongga udara, dan meningkatkan risiko bleeding. Oleh karena itu, gradasi gabungan yang berada dalam amplop spesifikasi menunjukkan bahwa campuran memiliki potensi untuk mencapai kepadatan dan stabilitas yang baik. Penelitian sebelumnya juga menyatakan bahwa struktur gradasi agregat berpengaruh penting

terhadap parameter volumetrik dan ketahanan deformasi campuran aspal ((Li et al., 2022; Zhu et al., 2024).

4.4.1 Analisis Gradasi

Tabel 4. 8 Tabel Analisis Gradasi

PENENTUAN PERSENTASE KOMPOSISI FRAKSI AGREGAT											
Saringan		Agregat Kasar		Agregat Halus		RAP			Kombinasi Agregat	AC-WC	
No	Ukuran	3/4"	1/2"	Pasir	Abu Batu	>9,5	9,5-4	<4		Spesifikasi	
	(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	Bawah	Atas
3/4"	19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
1/2"	12,500	71,35	100,00	100,00	100,00	41,80	100,00	100,00	90,20	90	100
3/8"	9,500	59,95	76,42	100,00	100,00	0,82	99,22	100,00	81,43	77	90
#4	4,750	28,40	42,93	100,00	100,00	0,82	0,05	100,00	60,18	53	69
#8	2,360	3,32	18,07	93,47	82,46	0,82	0,05	42,44	38,92	33	53
#16	1,180	2,71	5,14	81,23	67,82	0,82	0,05	13,04	28,15	21	40
#30	0,600	2,30	5,07	53,86	41,49	0,82	0,05	7,60	18,03	14	30
#50	0,300	2,26	4,87	30,54	27,23	0,82	0,05	2,91	11,48	9	22
#100	0,150	2,23	3,37	14,50	17,27	0,82	0,05	0,74	6,88	6	15
#200	0,075	1,54	2,50	12,22	11,35	0,82	0,05	0,04	4,81	4	9
PAN	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Perbandingan campuran dari persentase berat total agregat		Agregat 3/4"						=	20	%	
		Agregat 1/2"						=	15	%	
		Pasir No. 4						=	10	%	
		Abu Batu No. 4						=	25	%	
		RAP >9,5						=	7	%	
		RAP 9,5-4						=	10	%	
		RAP <4						=	13	%	
		Total						=	100	%	

Berdasarkan hasil analisis gradasi pada Tabel 4. 8, dilakukan penentuan persentase komposisi fraksi agregat untuk memperoleh gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi campuran AC-WC. Material yang digunakan dalam penyusunan gradasi gabungan terdiri dari agregat kasar, agregat halus, serta material RAP.

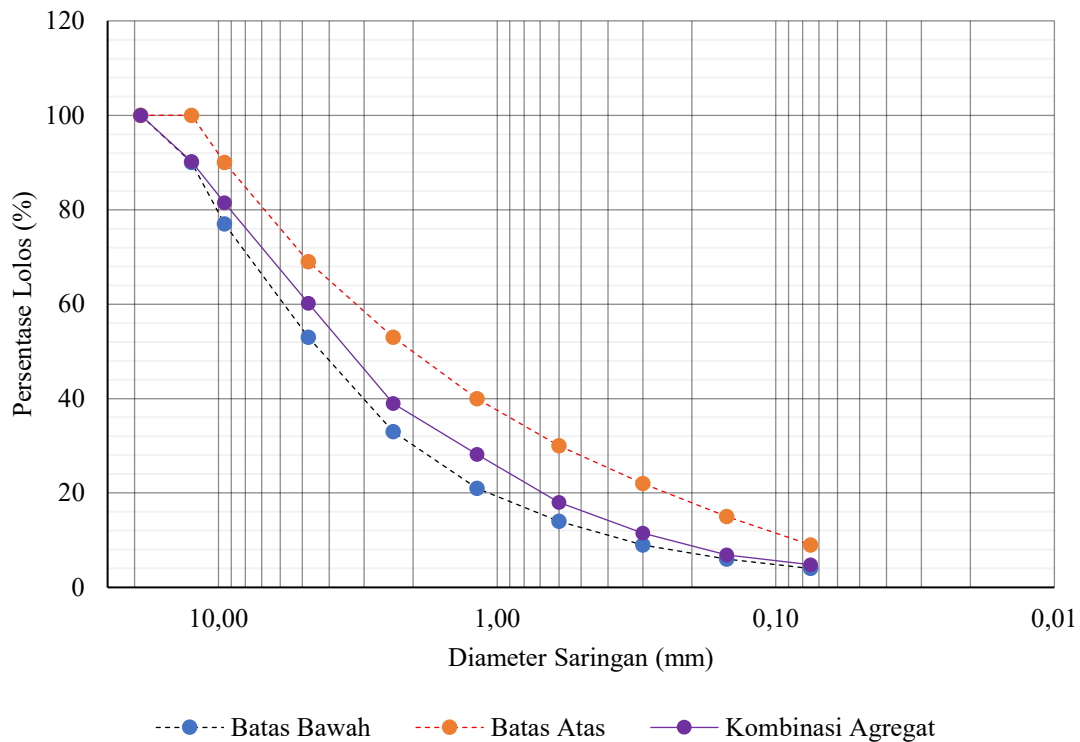
Komposisi campuran agregat yang digunakan terdiri dari agregat 3/4 sebesar 20%, agregat 1/2 sebesar 15%, pasir No. 4 sebesar 10%, abu batu No. 4 sebesar 25%, RAP >9,5 sebesar 7%, RAP 9,5-4 sebesar 10%, dan RAP <4 sebesar 13%. Dari keseluruhan komposisi tersebut diperoleh total campuran agregat sebesar 100%. Perbandingan ini digunakan untuk menghasilkan gradasi gabungan yang memenuhi batas spesifikasi yang telah ditentukan.

Hasil gradasi gabungan menunjukkan bahwa pada saringan 3/4 inci atau 19,00 mm, persentase lolos sebesar 100%, sesuai dengan batas spesifikasi yaitu 100%. Pada saringan 1/2 inci atau 12,50 mm, diperoleh persentase lolos sebesar 90,20%, yang masih berada dalam rentang spesifikasi 90–100%. Selanjutnya, pada saringan 3/8 inci atau 9,50 mm, nilai gradasi gabungan sebesar 81,43%, masih berada dalam batas spesifikasi 77–90%.

Pada saringan No. 4 atau 4,750 mm, persentase lolos agregat gabungan sebesar 60,18%, berada dalam rentang spesifikasi 53–69%. Pada saringan No. 8 atau 2,360 mm, diperoleh nilai sebesar 38,92%, yang juga masih memenuhi spesifikasi 33–53%. Kemudian pada saringan No. 16 atau 1,180 mm, persentase lolos sebesar 28,15%, berada dalam rentang spesifikasi 21–40%.

Untuk saringan yang lebih halus, yaitu No. 30 atau 0,600 mm, nilai gradasi gabungan sebesar 18,03%, masih berada dalam batas spesifikasi 14–30%. Pada saringan No. 50 atau 0,300 mm, diperoleh nilai sebesar 11,48%, sesuai dengan spesifikasi 9–22%. Selanjutnya, pada saringan No. 100 atau 0,150 mm, nilai persentase lolos sebesar 6,88%, berada dalam rentang spesifikasi 6–15%. Pada saringan No. 200 atau 0,075 mm, diperoleh nilai sebesar 4,81%, yang masih memenuhi spesifikasi 4–9%.

Berdasarkan hasil tersebut, seluruh nilai gradasi gabungan berada di antara batas bawah dan batas atas spesifikasi AC-WC. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi agregat yang digunakan telah memenuhi persyaratan gradasi yang ditentukan. Dengan demikian, komposisi campuran agregat tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan Job Mix Formula.



Gambar 4. 2 Grafik Amplop Gradasi Gabungan

Selain ditampilkan dalam bentuk tabel, hasil analisis gradasi juga disajikan dalam bentuk grafik gradasi gabungan dalam Gambar 4.2 Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara ukuran diameter saringan dengan persentase agregat yang lolos. Kurva gradasi gabungan terlihat berada di antara garis batas bawah dan batas atas spesifikasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran agregat memiliki distribusi ukuran butiran yang baik dan sesuai dengan amplop gradasi yang disyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025).

Nantinya, pada bagian amplop gradasi, grafik gradasi gabungan dapat digunakan untuk memperjelas bahwa kurva kombinasi agregat tidak keluar dari batas spesifikasi. Amplop gradasi berfungsi sebagai batas kontrol untuk memastikan bahwa gradasi campuran berada dalam rentang yang diizinkan. Apabila kurva gradasi gabungan berada di dalam amplop gradasi, maka campuran agregat dapat dikatakan memenuhi syarat dan layak digunakan dalam perencanaan campuran beraspal AC-WC.

Secara umum, hasil analisis gradasi menunjukkan bahwa kombinasi agregat kasar, agregat halus, dan RAP yang digunakan telah menghasilkan gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi. Hal ini penting karena gradasi agregat berpengaruh terhadap kepadatan campuran, stabilitas, rongga udara, serta kemampuan campuran dalam menerima beban lalu lintas. Gradasi yang baik akan membantu menghasilkan campuran aspal yang lebih stabil, padat, dan memiliki kinerja yang optimal di lapangan.

4.4.2 Komposisi Job Mix Formula RAP 30%

Perencanaan Job Mix Formula (JMF) dengan penggunaan RAP sebesar 30% dilakukan untuk mengetahui komposisi campuran yang paling optimal berdasarkan variasi kadar aspal. Pada tahap ini digunakan beberapa variasi kadar aspal, yaitu 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, dan 5,5%, yang nantinya diuji untuk menentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran dengan tambahan RAP 30%.

Variasi kadar aspal tersebut digunakan agar dapat dilihat pengaruh penambahan aspal terhadap karakteristik campuran, seperti stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan parameter Marshall lainnya. Hasil dari pengujian setiap variasi kadar aspal kemudian menjadi dasar dalam menentukan kadar aspal yang paling sesuai untuk campuran beraspal dengan pemanfaatan material RAP.

Tabel 4. 9 Komposisi JMF

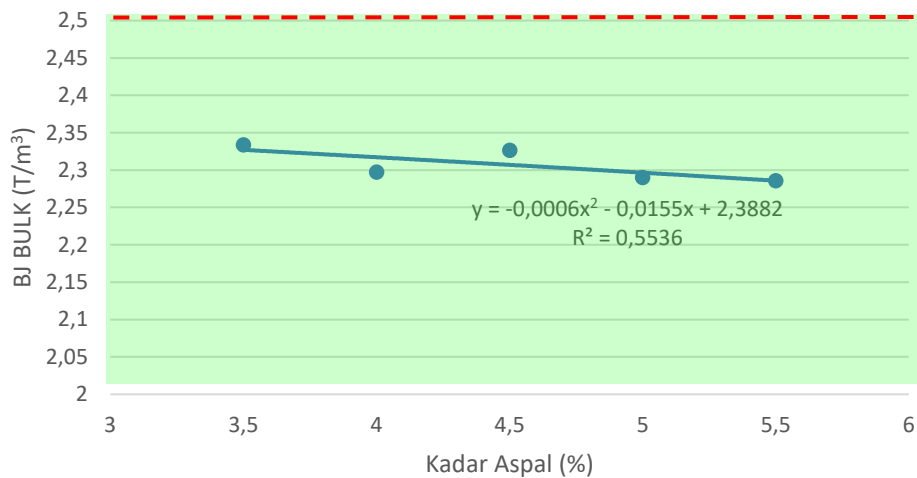
Kadar Aspal	Berat Aspal	Berat Agregat	Berat Total Benda Uji
3,5%	42 gram	1158 gram	1200 gram
4,0%	48 gram	1152 gram	1200 gram
4,5%	54 gram	1146 gram	1200 gram
5,0%	60 gram	1140 gram	1200 gram
5,5%	66 gram	1134 gram	1200 gram
6,0%	72 gram	1128 gram	1200 gram
6,5%	78 gram	1122 gram	1200 gram

4.5 Hasil Pengujian Marshall Campuran RAP 30%

Pengujian Marshall pada campuran RAP 30% dilakukan untuk mengevaluasi parameter volumetrik dan mekanik campuran. Parameter yang dianalisis meliputi berat jenis bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ).

Pengujian Marshall pada campuran RAP 30% dilakukan untuk mengevaluasi parameter volumetrik dan mekanik campuran. Parameter yang dianalisis meliputi berat jenis bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ).

4.5.1 BJ Bulk Campuran



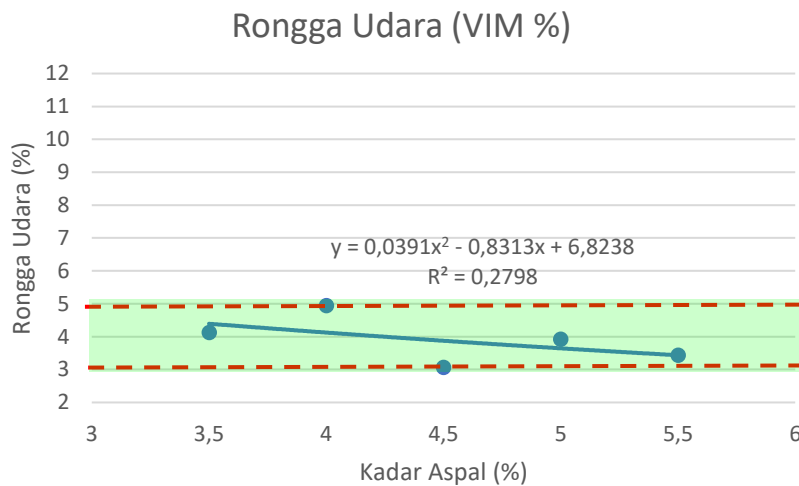
Gambar 4. 3 Grafik BJ Bulk Campuran

Berdasarkan Gambar 4.3 nilai BJ Bulk campuran RAP 30% cenderung menurun seiring bertambahnya kadar aspal. Nilai tertinggi diperoleh pada kadar aspal 3,5% sebesar 2,334 t/m³, sedangkan nilai terendah terjadi pada kadar aspal 5,5% sebesar 2,286 t/m³. Penurunan BJ Bulk menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal tidak selalu meningkatkan kepadatan campuran. Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -0,0006x^2 - 0,0155x + 2,3882$ dengan $R^2 = 0,5536$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) dalam campuran, sedangkan x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan BJ Bulk bersifat polinomial. Koefisien negatif mengindikasikan bahwa peningkatan kadar aspal cenderung menurunkan nilai BJ Bulk. Nilai $R^2 = 0,5536$ menunjukkan bahwa 55,36% variasi BJ Bulk dapat dijelaskan oleh perubahan kadar aspal, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

Secara teknis, pada kadar aspal rendah, aspal berfungsi sebagai pelumas antaragregat sehingga membantu proses pemadatan. Namun, apabila kadar aspal terus meningkat, aspal yang berlebihan dapat mengganggu kontak antarbutiran agregat dan menyebabkan struktur agregat menjadi kurang terkunci. Kondisi ini dapat menurunkan kepadatan efektif campuran. Pada campuran berbasis RAP, fenomena ini juga dapat dipengaruhi oleh keberadaan aspal lama yang melekat pada agregat RAP. Jika aspal baru dan aspal lama tidak berinteraksi secara merata, maka distribusi binder dapat menjadi kurang homogen dan memengaruhi berat jenis bulk campuran. Parameter BJ Bulk penting

karena berkaitan langsung dengan kepadatan dan nilai rongga dalam campuran (Khan et al., 2025).

4.5.2 Grafik Rongga Udara / VIM



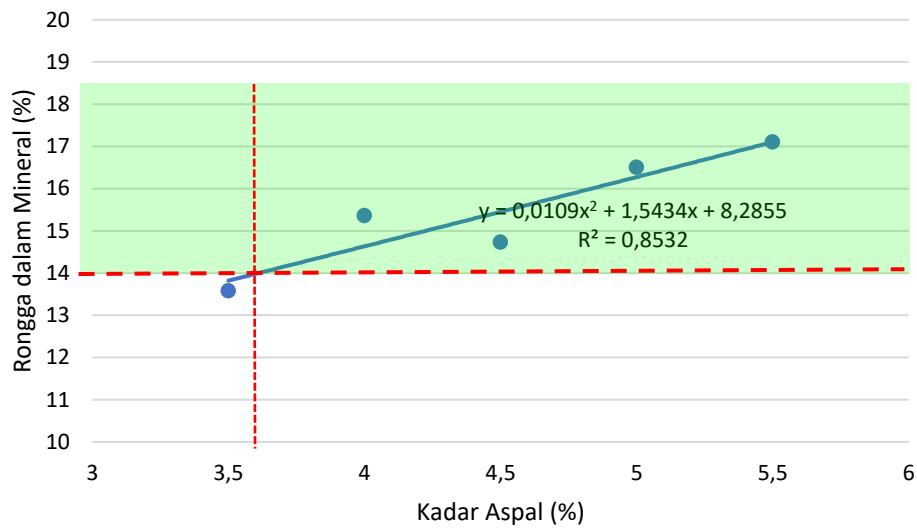
Gambar 4. 4 Grafik VIM

Berdasarkan Gambar 4.4, Nilai VIM menunjukkan persentase rongga udara dalam campuran setelah dipadatkan. Pada campuran RAP 30%, nilai VIM berada dalam rentang spesifikasi, yaitu sekitar 3–5%. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran memiliki rongga udara yang cukup untuk mengakomodasi pemadatan lanjutan akibat lalu lintas, tetapi tidak terlalu besar sehingga masih dapat membatasi masuknya air dan udara ke dalam campuran. Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 0,0391x^2 - 0,8313x + 6,8238$ dengan $R^2 = 0,2798$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) dalam campuran, sedangkan x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai VIM bersifat polinomial. Nilai $R^2 = 0,2798$ menunjukkan bahwa 27,98% variasi nilai VIM dapat dijelaskan oleh perubahan kadar aspal, sedangkan 72,02% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

Secara teknis, nilai VIM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran mudah mengalami oksidasi, kerusakan akibat air, dan pelepasan butir karena air dapat masuk ke dalam rongga campuran. Sebaliknya, nilai VIM yang terlalu rendah dapat menyebabkan campuran terlalu padat dan berisiko mengalami bleeding ketika menerima beban lalu lintas dan temperatur tinggi. Oleh karena itu, nilai VIM yang memenuhi spesifikasi

menunjukkan bahwa kadar aspal dan gradasi campuran RAP 30% masih berada pada kondisi yang cukup seimbang. Hal ini sesuai dengan fungsi VIM sebagai indikator durabilitas dan tingkat kepadatan campuran beraspal (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025).

4.5.3 Rongga Dalam Mineral Agregat / VMA



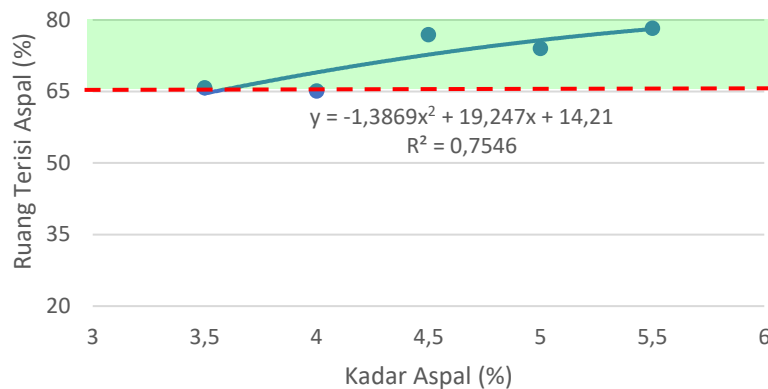
Gambar 4. 5 Grafik VMA

Berdasarkan Gambar 4.5 yaitu grafik VMA, terlihat bahwa nilai rongga dalam mineral agregat cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Pada kadar aspal 3,5%, nilai VMA berada pada nilai terendah, yaitu 13,58%, kemudian mengalami peningkatan pada kadar aspal berikutnya. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa volume rongga di antara partikel agregat semakin besar dan dapat terisi oleh aspal serta udara. Nilai VMA yang memenuhi spesifikasi sangat penting karena berpengaruh terhadap kemampuan campuran dalam menampung aspal. Apabila nilai VMA terlalu kecil, maka kadar aspal efektif dalam campuran menjadi kurang, sehingga campuran dapat menjadi kurang awet. Dari hasil grafik, sebagian besar nilai VMA telah memenuhi batas minimum yang disyaratkan, sehingga campuran dinilai cukup baik dari segi rongga antar agregat (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 0,0109x^2 + 1,5434x + 8,2855$ dengan $R^2 = 0,8532$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) dalam campuran, sedangkan x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai

VMA bersifat polinomial. Nilai $R^2 = 0,8532$ menunjukkan bahwa 85,32% variasi nilai VMA dapat dijelaskan oleh perubahan kadar aspal, sedangkan 14,68% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

4.5.4 Rongga Terisi Aspal / VFB



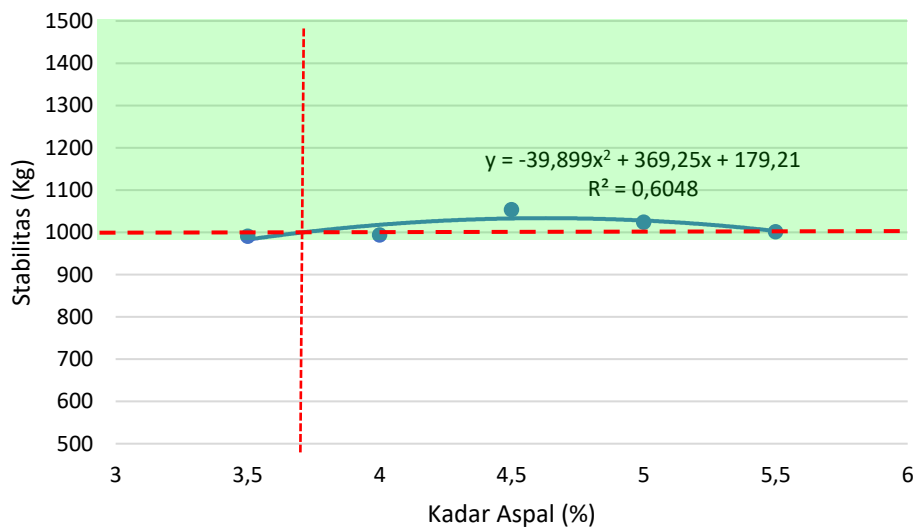
Gambar 4. 6 Grafik VFB

Berdasarkan Gambar 4.6, yaitu Grafik VFB menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan persentase rongga yang terisi oleh aspal. Berdasarkan hasil pengujian, nilai VFB cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar aspal yang digunakan, maka semakin banyak rongga dalam campuran yang terisi oleh aspal. Nilai VFB pada seluruh variasi kadar aspal berada di atas batas minimum spesifikasi, yaitu 65%. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran memiliki kadar aspal yang cukup untuk mengisi rongga antar agregat. Namun, kadar aspal yang terlalu tinggi juga perlu dihindari karena dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis dan berpotensi mengalami bleeding. Dengan demikian, nilai VFB yang diperoleh menunjukkan bahwa campuran masih berada dalam kondisi yang memenuhi persyaratan (Costa et al., 2024; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -1,3869x^2 + 19,247x + 14,21$ dengan $R^2 = 0,7546$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan

bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai VFB tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai VFB tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,7546$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu menjelaskan 75,46% variasi nilai VFB akibat perubahan kadar aspal, sedangkan 24,54% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

4.5.5 Stabilitas

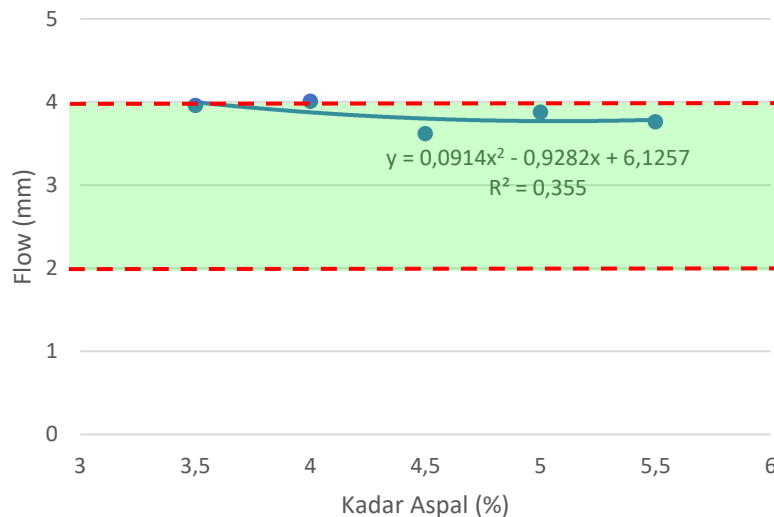


Gambar 4. 7 Grafik Stabilitas

Berdasarkan Gambar 4.7 yaitu grafik hubungan antara kadar aspal dan stabilitas, terlihat bahwa nilai stabilitas mengalami peningkatan hingga kadar aspal tertentu, kemudian mengalami penurunan kembali. Nilai stabilitas terendah diperoleh pada kadar aspal 3,5% sebesar 991,30 kg, sedangkan nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar aspal 4,5% sebesar 1053,50 kg. Peningkatan stabilitas sampai kadar aspal 4,5% menunjukkan bahwa penambahan aspal dapat meningkatkan ikatan antar agregat sehingga campuran menjadi lebih kuat dalam menerima beban. Namun, setelah melewati kadar aspal tersebut, nilai stabilitas mengalami penurunan karena kadar aspal yang berlebih dapat membuat campuran menjadi lebih plastis dan mengurangi kekuatan antar agregat. Dengan demikian, kadar aspal 4,5% memberikan nilai stabilitas paling baik dibandingkan variasi kadar aspal lainnya. Oleh karena itu, stabilitas yang tinggi perlu tetap dianalisis bersama flow dan MQ agar tidak menghasilkan campuran yang terlalu kaku atau terlalu plastis (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022; Pasetto et al., 2021).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -39,899x^2 + 369,25x + 179,21$ dengan $R^2 = 0,6048$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai stabilitas tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai stabilitas tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,6048$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu menjelaskan 60,48% variasi nilai stabilitas akibat perubahan kadar aspal, sedangkan 39,52% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

4.5.6 Kelelehan / Flow



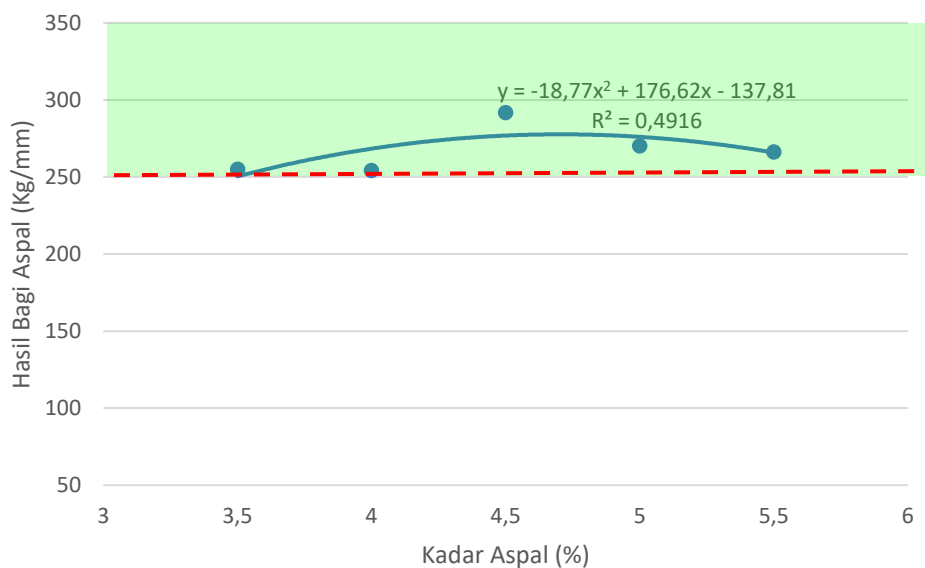
Gambar 4. 8 Grafik *Flow*

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat grafik kelelehan atau flow menunjukkan bahwa nilai flow pada setiap variasi kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi yang disyaratkan. Nilai flow tertinggi diperoleh pada kadar aspal 4% sebesar 4,010 mm, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kadar aspal 4,5% sebesar 3,620 mm. Secara umum, nilai flow menunjukkan tingkat kelenturan campuran terhadap beban. Nilai flow yang terlalu rendah menunjukkan campuran bersifat kaku dan mudah retak, sedangkan nilai flow yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu plastis dan mudah mengalami deformasi. Berdasarkan hasil pengujian, nilai flow yang diperoleh masih menunjukkan bahwa

campuran memiliki kelenturan yang cukup baik dan memenuhi persyaratan (Awan et al., 2022; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 0,0914x^2 - 0,9282x + 6,1257$ dengan $R^2 = 0,355$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai flow (kelelahan) tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai flow tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,355$ menunjukkan bahwa persamaan trendline tersebut mampu merepresentasikan sekitar 35,5% dari variasi data hasil pengujian, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar variasi kadar aspal yang diamati dalam penelitian ini.

4.5.7 Marshall Quotient / MQ



Gambar 4. 9 Grafik MQ

Berdasarkan gambar 4.9 yaitu grafik Marshall Quotient, terlihat bahwa nilai MQ mengalami peningkatan sampai kadar aspal 4,5%, kemudian menurun pada kadar aspal 5% dan 5,5%. Nilai MQ tertinggi diperoleh pada kadar aspal 4,5% sebesar 291,72 kg/mm, sedangkan nilai MQ terendah diperoleh pada kadar aspal 4% sebesar 254,29 kg/mm. Nilai Marshall Quotient menunjukkan perbandingan antara stabilitas dan flow, sehingga dapat

menggambarkan tingkat kekakuan campuran. Nilai MQ yang terlalu rendah menunjukkan campuran terlalu lentur, sedangkan nilai MQ yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu kaku. Dari hasil pengujian, seluruh nilai MQ masih berada di atas batas minimum yang disyaratkan, sehingga campuran dapat dikatakan memiliki kekakuan yang cukup baik.

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -18,77x^2 + 176,62x - 137,81$ dengan $R^2 = 0,4916$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai Marshall Quotient (MQ) tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai MQ tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,4916$ menunjukkan bahwa persamaan trendline tersebut mampu merepresentasikan sekitar 49,16% dari variasi data hasil pengujian, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar variasi kadar aspal yang diamati dalam penelitian ini.

Berdasarkan hasil analisis grafik parameter Marshall, dapat disimpulkan bahwa kadar aspal memiliki pengaruh terhadap kinerja campuran RAP 30%. Nilai-nilai yang diperoleh menunjukkan adanya perubahan karakteristik campuran pada setiap variasi kadar aspal. Oleh karena itu, penentuan kadar aspal optimum dilakukan dengan mempertimbangkan seluruh parameter Marshall, yaitu berat jenis bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient, agar diperoleh campuran yang memenuhi spesifikasi dan memiliki kinerja yang baik (Awan et al., 2022; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025).

Berdasarkan hasil pengujian Marshall RAP 30% dengan beberapa variasi kadar aspal didapatkan sebagai berikut pada Tabel 4.12:

Tabel 4. 10 Pengujian Marshall Test

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal	Bj Maks Campuran	Isi Benda Uji	Berat (Gram)			Bj Bulk Campuran	Rongga Udara (Vim)	Rongga Dalam Min Agg (Vma)	Rongga Terisi Aspal (Vfb)	Stabilitas		Kelelahan Plastis	Hasil Bagi Maksimal	Flow	Hasil (Mq)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	3,5	2,434	503,93	1176	678,33	1182,27	2,334	4,121	13,579	65,826	104	991,302	0,040	24997,016	3,960	254,970	0,985
2	4	2,417	510,03	1171,5	668,33	1178,37	2,297	4,943	15,361	65,100	107	994,029	0,040	24930,421	4,010	254,290	0,960
3	4,5	2,400	503,33	1171	670	1173,33	2,327	3,061	14,733	76,962	110,33	1053,496	0,036	28600,176	3,620	291,722	0,986
4	5	2,383	515,10	1179,6	666,67	1181,77	2,290	3,915	16,508	74,026	107,67	1024,337	0,039	26498,637	3,877	270,286	0,983
5	5,5	2,367	515,27	1177,6	661,67	1176,93	2,286	3,438	17,108	78,273	105,67	1001,554	0,038	26097,349	3,763	266,193	0,979

4.6 Penentuan Kadar Aspal Optimum

Tabel 4. 11 SKh-1.6.27.3. (2) Ketentuan Sifat Campuran Beraspal Panas Daur Ulang

Sifat-sifat campuran	Standar uji	LTBA BRAP		ACRAP		
		Gradiasi halus	Gradiasi kasar	WC RAP	BC RAP	Base RAP
Jumlah tumbukan per bidang	ASTM D6926-10	75	75	75	75	112(1)
Rasio abu terhadap aspal	AASHTO M323	0,6–1,6	0,6–1,6	0,6–1,2	0,6–1,2	0,6–1,2
Rongga dalam campuran (VIM), %	AASHTO M323	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)
Rongga dalam mineral agregat (VMA), %	AASHTO M323	Min. 15	Min. 15	Min. 14	Min. 13	Min. 12
Rongga terisi aspal (VFB), %	AASHTO M323	Min. 65	Min. 65	Min. 65	Min. 65	Min. 65
Stabilitas Marshall, kg	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	Min. 900	Min. 900	Min. 1000	Min. 1000	Min. 2250(1)
Pelelehan, mm	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	2,0–4,5	2,0–4,5	2,0–4,0	2,0–4,0	3,0(1)–6,0(1)
Stabilitas Marshall sisa, %	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	Min. 90	Min. 90	Min. 90	Min. 90	Min. 90
Stabilitas Dinamis, Lintasan/mm (3)	JRA-1980	Min. 2000	Min. 2000	Min. 2500	Min. 2500	Min. 2500

Pada Tabel 4.11 terdapat Spesifikasi Campuran Beraspal Panas Daur Ulang Pencampuran Di Unit Produksi Campuran Aspal menurut Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga agar dapat menentukan Kadar Aspal Optimum AC-WC RAP maka spesifikasi menjadi acuan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019).

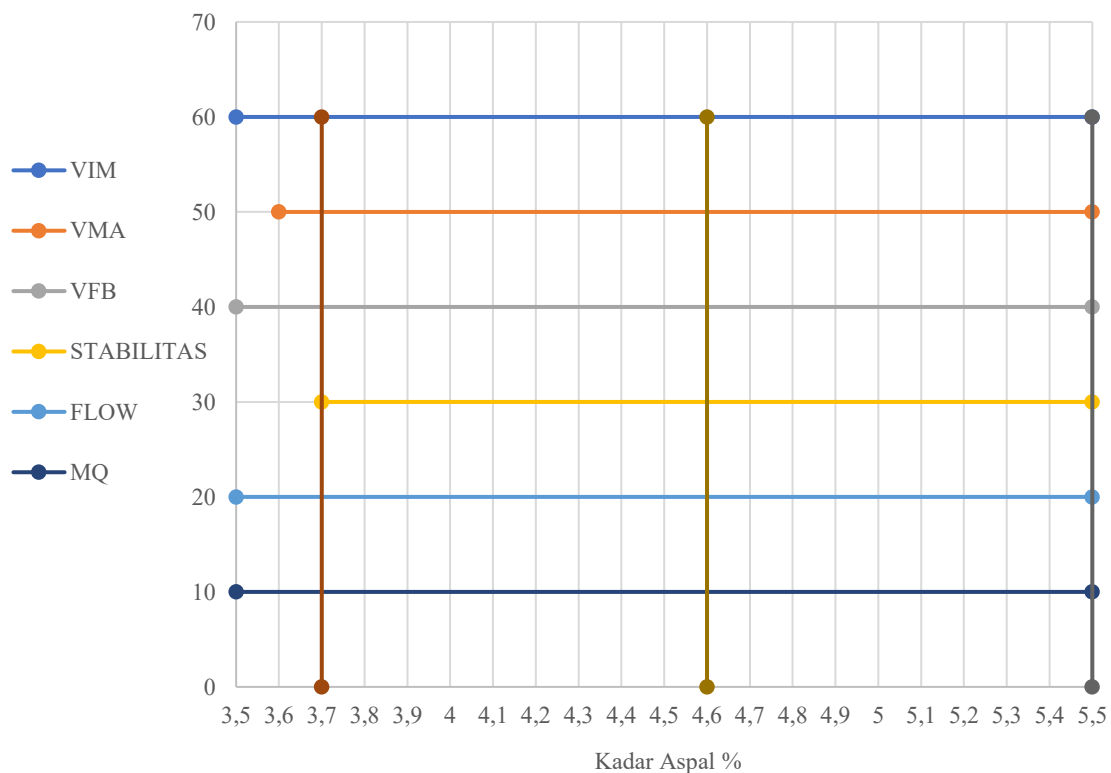
Penentuan kadar aspal optimum pada campuran dengan penggunaan RAP 30% dilakukan berdasarkan hasil pengujian Marshall pada beberapa variasi kadar aspal, yaitu 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, dan 5,5%. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar aspal yang paling memenuhi seluruh parameter persyaratan campuran, seperti VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ) dapat dilihat pada Tabel 4.14:

Tabel 4. 12 Kadar Aspal

Kadar Aspal	BJ Bulk	VIM	VMA	VFB	STABILITAS	FLOW	MQ
3,5	2,334	4,121	13,579	65,826	991,302	3,960	254,970
4	2,297	4,943	15,361	65,100	994,029	4,010	254,290
4,5	2,327	3,061	14,733	76,962	1053,496	3,620	291,722
5	2,290	3,915	16,508	74,026	1024,337	3,877	270,286
5,5	2,286	3,438	17,108	78,273	1001,554	3,763	266,193
SPESIFIKASI	maks. 2,5	min 3 - 5	MIN. 14	MIN. 65	min. 1000	min 2 - 4	min 250

Berdasarkan hasil pengujian, nilai VIM pada setiap variasi kadar aspal masih berada dalam rentang spesifikasi yaitu 3–5%. Nilai VMA juga menunjukkan hasil yang memenuhi syarat, kecuali pada kadar aspal 3,5% yang masih berada di bawah batas minimum 14%. Untuk parameter VFB, seluruh variasi kadar aspal telah memenuhi batas minimum yaitu 65%.

Pada parameter stabilitas, kadar aspal 3,5% dan 4% belum memenuhi batas minimum spesifikasi yaitu 1000 kg, sedangkan kadar aspal 4,5%, 5%, dan 5,5% telah memenuhi persyaratan. Nilai flow pada seluruh kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi 2–4 mm, meskipun pada kadar aspal 4% nilainya mendekati batas atas. Sementara itu, nilai Marshall Quotient (MQ) pada seluruh variasi kadar aspal telah memenuhi batas minimum yaitu 250 kg/mm.



Gambar 4. 10 Diagram Pemilihan KAO RAP

Berdasarkan Gambar 4.10 dapat dilihat diagram pemilihan kadar aspal optimum, diperoleh rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter spesifikasi yaitu antara 3,7% sampai 5,5%. Nilai batas bawah diperoleh dari parameter yang mulai memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 3,7%, sedangkan batas atas berada pada kadar aspal 5,5%. Selanjutnya, kadar aspal optimum ditentukan dari nilai tengah rentang tersebut.

Perhitungan kadar aspal optimum adalah sebagai berikut dengan menggunakan rumus 3.11:

$$KAO = (3,7\% + 5,5\%) / 2 = 4,6\% \quad (3.11)$$

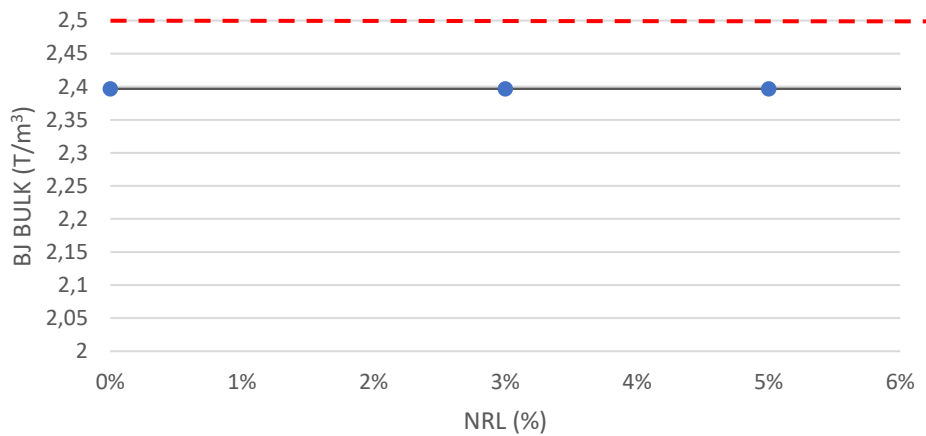
Dengan demikian, kadar aspal optimum untuk campuran dengan penggunaan RAP 30% diperoleh sebesar 4,6%. Nilai ini digunakan sebagai kadar aspal rencana pada campuran beraspal dengan material RAP, karena telah memenuhi parameter karakteristik Marshall dan berada dalam rentang spesifikasi yang disyaratkan.

4.7 Hasil Pengujian Marshall dengan Penambahan NRL

Pengujian Marshall dengan penambahan NRL dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kadar NRL terhadap karakteristik campuran beraspal pada kadar aspal optimum. Variasi kadar NRL yang digunakan yaitu 0%, 3%, dan 5%. Parameter yang diamati meliputi berat jenis bulk campuran, rongga udara atau VIM, rongga dalam mineral agregat atau VMA, rongga terisi aspal atau VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient.

Hasil pengujian Marshall dengan penambahan NRL digunakan untuk mengetahui perubahan karakteristik campuran akibat adanya penambahan bahan NRL. Data hasil pengujian dari masing-masing variasi kemudian dibandingkan dengan spesifikasi yang berlaku.

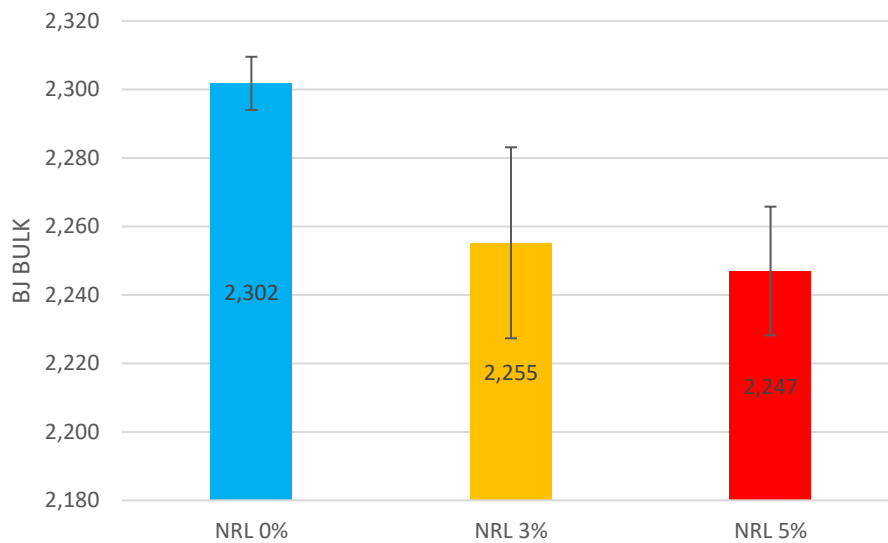
4.7.1 BJ Bulk Campuran RAP+NRL



Gambar 4. 11 Grafik BJ Bulk Campuran

Berdasarkan Gambar 4.11, hasil pengujian Marshall pada KAO 4,6% menunjukkan bahwa penambahan NRL tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap nilai BJ Bulk campuran. Nilai BJ Bulk cenderung relatif stabil pada setiap variasi, meskipun pada kadar NRL 5% diperoleh nilai terendah sebesar 2,247. Perbedaan nilai tersebut masih tergolong kecil sehingga belum dapat menunjukkan adanya pengaruh penurunan yang nyata terhadap kepadatan campuran.

Secara teknis, penambahan NRL dapat memengaruhi sifat binder menjadi lebih elastis dan lebih kental sehingga berpotensi mengubah proses penyelimutan agregat dan pemadatan. Namun, pada penelitian ini perubahan nilai BJ Bulk yang terjadi relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa penambahan NRL pada variasi yang digunakan belum memberikan dampak signifikan terhadap kepadatan campuran. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penggunaan NRL masih dapat mempertahankan karakteristik kepadatan campuran pada rentang kadar yang diteliti (Suwanto et al., 2023; Wen et al., 2017a).

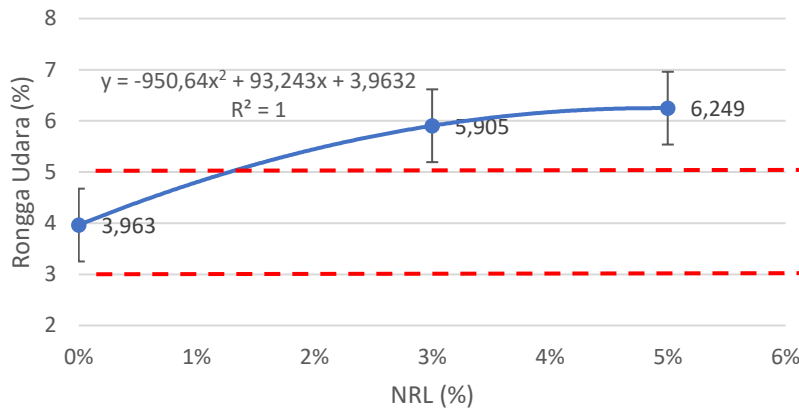


Gambar 4. 12 Diagram Bj Bulk

Berdasarkan Gambar 4.12, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Berat Jenis Bulk (BJ Bulk) cenderung menurun. Nilai BJ Bulk pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 2,302, kemudian menurun menjadi 2,255 pada NRL 3% dan kembali menurun menjadi 2,247 pada NRL 5%. Penurunan nilai BJ Bulk menunjukkan bahwa kepadatan campuran berkurang seiring meningkatnya kadar NRL. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan nilai VIM yang menunjukkan bertambahnya rongga udara dalam campuran, sehingga berat jenis campuran menjadi lebih rendah.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian BJ Bulk. Nilai standar deviasi BJ Bulk untuk campuran RAP+NRL sebesar 0,0078 (0%), 0,0279 (3%), dan 0,0188 (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% memiliki variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan campuran lainnya. Sementara itu, campuran NRL 0% menunjukkan hasil yang paling konsisten karena memiliki nilai standar deviasi paling kecil.

4.7.2 Grafik Rongga Udara / VIM RAP+NRL



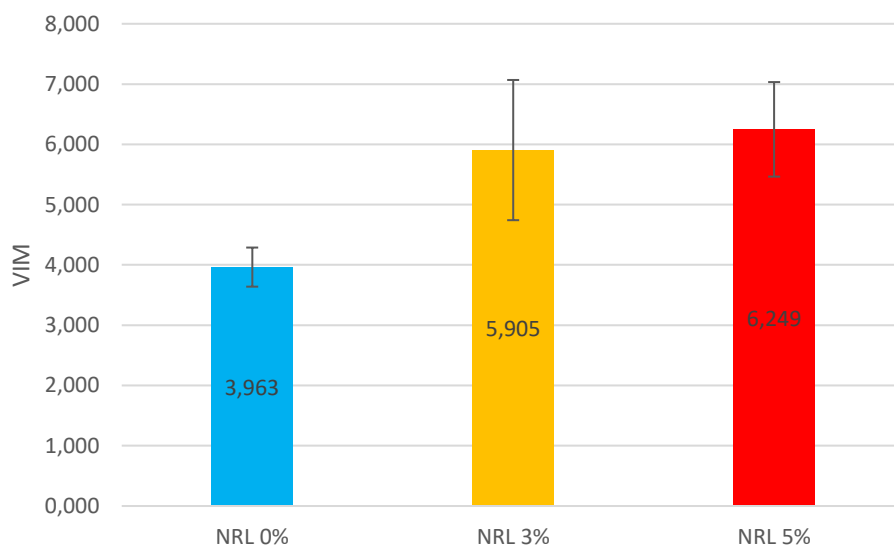
Gambar 4. 13 Grafik VIM

Berdasarkan Gambar 4.13 nilai VIM pada campuran dengan NRL cenderung meningkat, terutama pada NRL 5% yang mencapai 6,249%. Peningkatan VIM menunjukkan bertambahnya rongga udara dalam campuran. Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -950,64x^2 + 93,243x + 3,9632$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar NRL yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai VIM tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai VIM tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan NRL. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu merepresentasikan seluruh data hasil pengujian dengan sangat baik, sehingga perubahan nilai VIM dapat dijelaskan sepenuhnya oleh variasi kadar NRL yang digunakan pada penelitian ini.

Secara teknis, hal ini dapat terjadi karena penambahan NRL meningkatkan viskositas binder dan membuat campuran lebih elastis, sehingga campuran menjadi kurang mudah dipadatkan apabila suhu, durasi pencampuran, dan energi pemadatan tidak dikontrol secara optimal (Suwanto et al., 2023; Wen et al., 2017a). Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan NRL tidak selalu menurunkan kinerja campuran, tetapi dapat memengaruhi *workability* sehingga campuran berpotensi membutuhkan proses pemadatan yang lebih efektif atau energi pemadatan yang lebih besar agar rongga udara

dapat berada dalam batas spesifikasi. Hal ini sejalan dengan yang menunjukkan bahwa penggunaan NRL pada material RAP dapat memberikan pengaruh positif pada kadar tertentu, namun tetap memerlukan kontrol terhadap komposisi dan proses pemadatan agar memenuhi spesifikasi (Paotong et al., 2020b).

Nilai VIM yang tinggi perlu diperhatikan karena rongga udara yang berlebihan dapat menjadi jalur masuk air dan udara ke dalam campuran. Kondisi tersebut dapat mempercepat oksidasi binder, menurunkan adhesi aspal-agregat, dan meningkatkan potensi ravelling. Oleh karena itu, meskipun NRL berpotensi meningkatkan elastisitas dan daya lekat campuran, kadar yang terlalu tinggi tetap perlu dikontrol agar tidak menyebabkan rongga udara melebihi batas ideal dan tidak menurunkan performa volumetrik campuran. Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa campuran RAP dengan penambahan NRL perlu memperhatikan aspek *workability* dan pemadatan, karena pada penerapan lapangan campuran semacam ini dapat memerlukan pengaturan suhu serta energi pemadatan yang lebih memadai (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025)



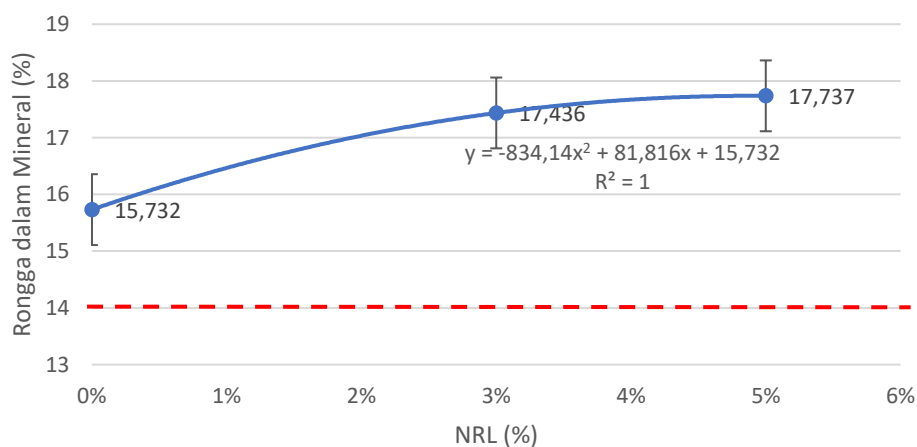
Gambar 4. 14 Diagram VIM

Berdasarkan Gambar 4.14, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Void in Mix (VIM) cenderung meningkat. Nilai VIM pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 3,963%, kemudian meningkat menjadi 5,905% pada NRL 3% dan 6,249% pada

NRL 5%. Peningkatan nilai VIM menunjukkan bahwa jumlah rongga udara dalam campuran semakin besar seiring bertambahnya kadar NRL. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran menjadi kurang padat sehingga berpotensi meningkatkan permeabilitas dan mempercepat proses penuaan perkerasan apabila kadar rongga udara terlalu tinggi.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian VIM. Nilai standar deviasi VIM untuk campuran RAP+NRL sebesar 0,324% (0%), 1,163% (3%), dan 0,784% (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% memiliki variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan campuran NRL 0% dan NRL 5%, sedangkan campuran NRL 0% menunjukkan hasil yang paling konsisten karena memiliki nilai deviasi terkecil.

4.7.3 Rongga Dalam Mineral Agregat / VMA RAP+NRL

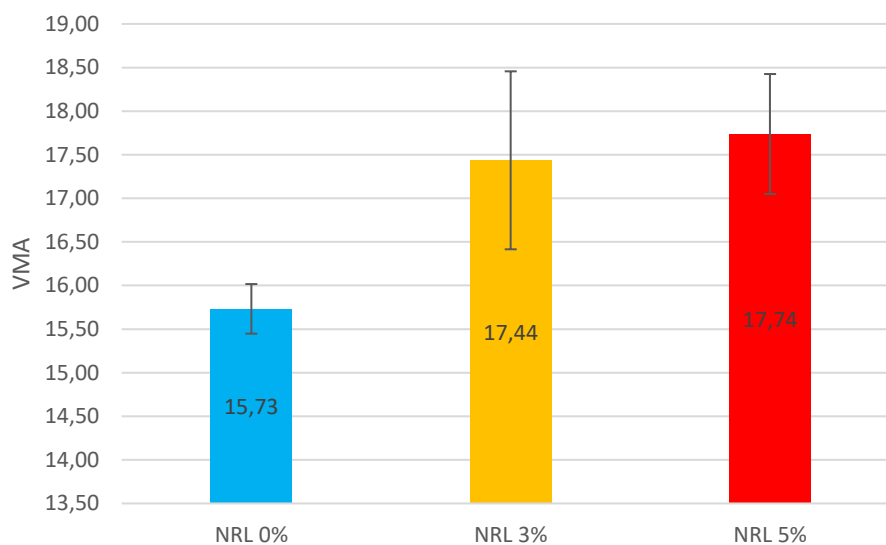


Gambar 4. 15 Grafik VMA

Berdasarkan Gambar 4.15, nilai rongga dalam mineral agregat atau Void in Mineral Aggregate (VMA) menunjukkan kecenderungan meningkat. Pada kadar NRL 0%, nilai VMA sebesar 15,732%, kemudian meningkat menjadi 17,436% pada kadar NRL 3%, dan menjadi 17,737% pada kadar NRL 5%. Seluruh nilai VMA tersebut masih memenuhi batas minimum spesifikasi, yaitu 14%. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa ruang antarbutir agregat dalam campuran semakin besar akibat penambahan NRL.

Kondisi ini sejalan dengan meningkatnya nilai VIM pada campuran (ASTM International, 2022; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -834,14x^2 + 81,816x + 15,732$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai VMA (%) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai VMA bersifat nonlinier atau mengikuti pola polinomial. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan VMA tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan NRL. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu merepresentasikan seluruh data hasil pengujian dengan sangat baik, sehingga variasi nilai VMA pada penelitian ini dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL yang digunakan.

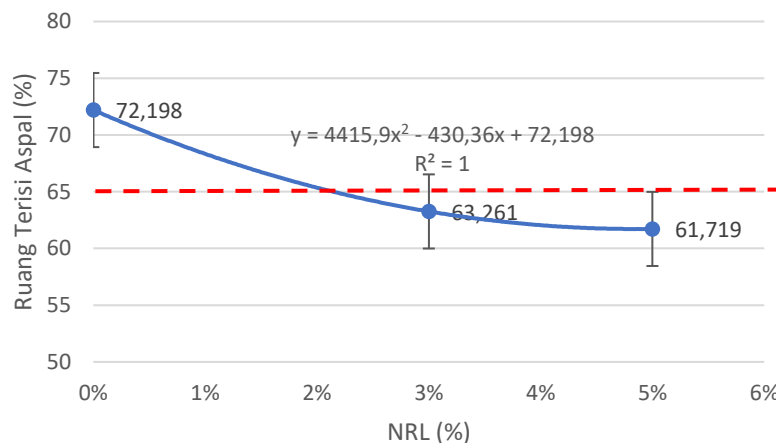


Gambar 4. 16 Diagram VMA

Berdasarkan Gambar 4.16, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Void in Mineral Aggregate (VMA) cenderung meningkat. Nilai VMA pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 15,73%, kemudian meningkat menjadi 17,44% pada NRL 3% dan kembali meningkat menjadi 17,74% pada NRL 5%. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa volume rongga antar butiran agregat dalam campuran semakin besar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur agregat menjadi lebih longgar sehingga ruang yang tersedia untuk aspal dan udara dalam campuran bertambah.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian VMA. Nilai standar deviasi VMA untuk campuran RAP+NRL sebesar 0,285% (0%), 1,021% (3%), dan 0,688% (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% menunjukkan variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan kadar NRL lainnya. Sementara itu, campuran NRL 0% memiliki variasi data paling kecil sehingga menunjukkan hasil pengujian yang lebih konsisten.

4.7.4 Rongga Terisi Aspal / VFB RAP+NRL

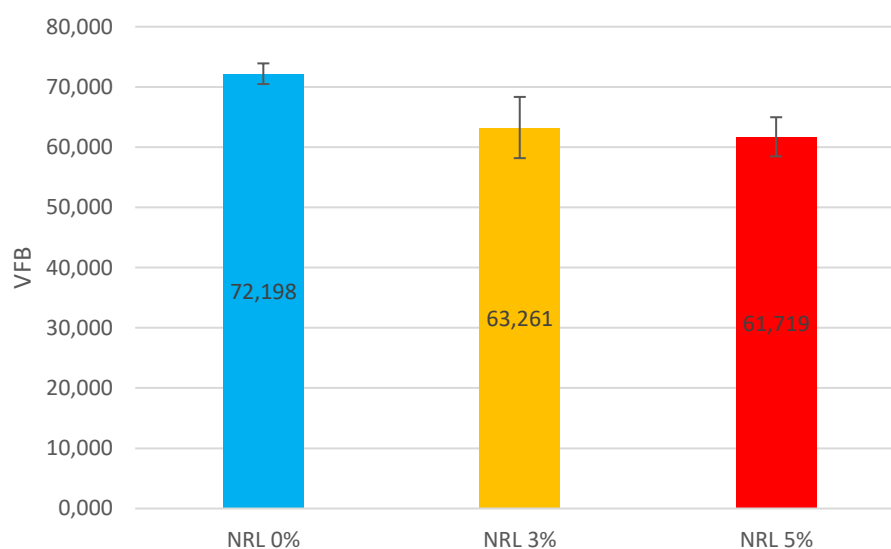


Gambar 4. 17 Grafik VFB

Berdasarkan Gambar 4.17, nilai rongga terisi aspal atau Void Filled with Bitumen (VFB) mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar NRL. Pada kadar NRL 0%, nilai VFB sebesar 72,198%, kemudian menurun menjadi 63,261% pada kadar NRL 3%, dan menjadi 61,719% pada kadar NRL 5%. Penurunan nilai VFB menunjukkan bahwa persentase rongga dalam agregat yang terisi aspal semakin berkurang. Hal ini dipengaruhi oleh meningkatnya rongga udara dalam campuran. Berdasarkan batas minimum spesifikasi 65%, campuran dengan kadar NRL 0% memenuhi spesifikasi, sedangkan kadar NRL 3% dan 5% belum memenuhi spesifikasi (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 4415,9x^2 - 430,36x + 72,198$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam

campuran, sedangkan y menunjukkan nilai VFB (%) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai VFB mengikuti pola polinomial atau nonlinier. Seiring bertambahnya kadar NRL, nilai VFB cenderung menurun dengan laju penurunan yang tidak konstan. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga perubahan nilai VFB dapat dijelaskan sepenuhnya oleh variasi kadar NRL yang digunakan pada penelitian ini.



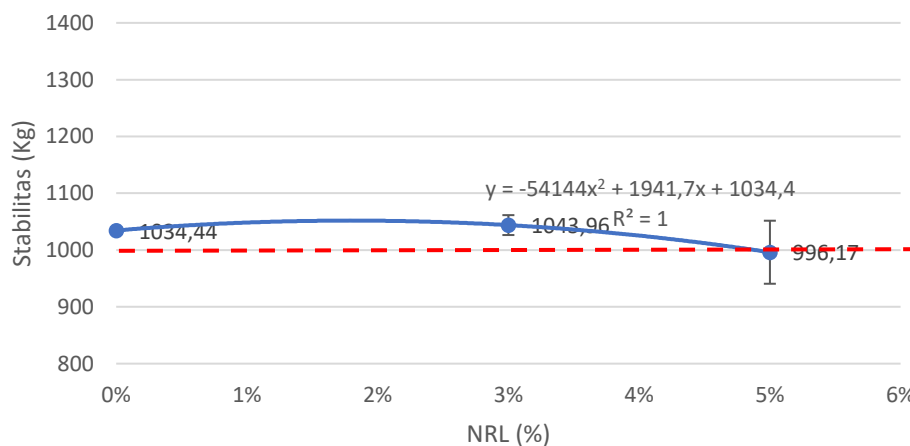
Gambar 4. 18 Diagram VFB

Berdasarkan Gambar 4.18, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Void Filled with Bitumen (VFB) cenderung menurun. Nilai VFB pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 72,20%, kemudian menurun menjadi 63,26% pada NRL 3% dan kembali menurun menjadi 61,79% pada NRL 5%. Penurunan nilai VFB menunjukkan bahwa persentase rongga agregat yang terisi aspal semakin berkurang seiring meningkatnya kadar NRL. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan nilai VIM dan VMA yang menunjukkan bertambahnya volume rongga dalam campuran, sehingga proporsi rongga yang terisi aspal menjadi lebih kecil.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian VFB. Nilai standar deviasi VFB untuk campuran RAP+NRL sebesar 1,72% (0%), 5,08% (3%), dan 3,25% (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar

penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% menunjukkan variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan kadar NRL lainnya. Sementara itu, campuran NRL 0% memiliki variasi data paling kecil sehingga menunjukkan hasil pengujian yang lebih konsisten.

4.7.5 Stabilitas RAP+NRL



Gambar 4. 19 Grafik Stabilitas

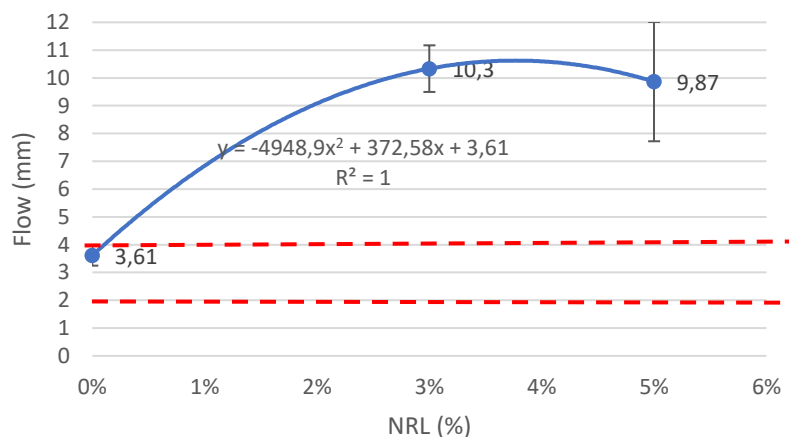
Berdasarkan Gambar 4.19, campuran NRL 0%, nilai stabilitas sebesar 1034,44 kg. Setelah penambahan NRL 3%, stabilitas meningkat menjadi 1043,96 kg dan menjadi nilai stabilitas tertinggi. Peningkatan ini menunjukkan bahwa NRL pada kadar 3% mampu memperbaiki ikatan antara aspal, agregat baru, dan material RAP. Secara teknis, NRL berperan sebagai modifier yang dapat meningkatkan elastisitas dan kohesi binder, sehingga campuran mampu menahan beban tekan lebih baik.

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -54144x^2 + 1941,7x + 1034,4$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai stabilitas (kg) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai stabilitas mengikuti pola polinomial atau nonlinier. Nilai stabilitas meningkat hingga mencapai titik optimum pada kadar NRL tertentu, kemudian mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL dalam jumlah terbatas dapat meningkatkan kekuatan campuran, namun penambahan yang berlebihan berpotensi

menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga variasi nilai stabilitas dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL pada penelitian ini.

Namun, pada kadar NRL 5%, stabilitas menurun menjadi 996,17 kg. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan NRL yang lebih besar tidak selalu meningkatkan kekuatan campuran. Kadar NRL yang terlalu tinggi dapat membuat campuran lebih plastis, menurunkan kepadatan, meningkatkan rongga udara, dan mengurangi interlocking antaragregat. Dengan demikian, kadar NRL 3% dapat dianggap lebih efektif karena masih mampu meningkatkan stabilitas tanpa menyebabkan penurunan struktur campuran secara berlebihan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa karet alam dapat meningkatkan kinerja campuran aspal pada kadar yang tepat, tetapi kadar yang terlalu tinggi dapat menurunkan kekuatan campuran (Nirwana et al., 2025; Paotong et al., 2020b; Wen et al., 2017a).

4.7.6 Kelelehan / Flow RAP+NRL



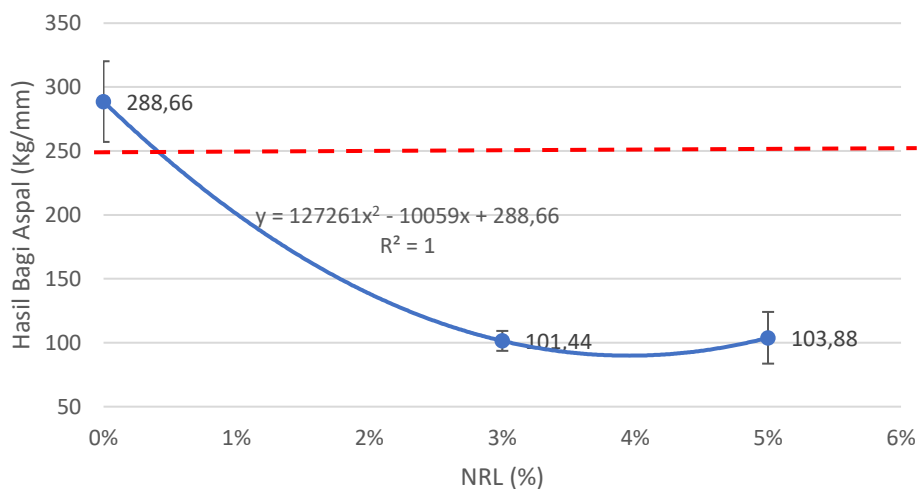
Gambar 4. 20 Grafik *Flow*

Berdasarkan Gambar 4.20, nilai kelelehan atau flow mengalami peningkatan yang cukup besar setelah penambahan NRL. Pada kadar NRL 0%, nilai flow sebesar 3,61 mm dan masih berada dalam batas spesifikasi 2–4 mm. Pada kadar NRL 3%, nilai flow meningkat menjadi 10,3 mm, sedangkan pada kadar NRL 5% sebesar 9,87 mm. Peningkatan nilai flow menunjukkan bahwa campuran memiliki deformasi yang lebih besar saat menerima

beban. Kondisi ini tidak selalu bersifat negatif, karena nilai flow yang lebih tinggi dalam batas tertentu dapat menunjukkan peningkatan fleksibilitas campuran akibat penambahan NRL. Namun, apabila nilai flow melebihi spesifikasi, campuran dapat menjadi terlalu plastis dan berpotensi mengalami deformasi permanen, sehingga hasil flow perlu dianalisis bersama parameter Marshall lainnya (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022; Wen et al., 2017a).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -1948,9x^2 + 372,58x + 3,61$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai flow (mm) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai flow bersifat nonlinier atau mengikuti pola polinomial. Nilai flow meningkat secara signifikan hingga mencapai nilai maksimum pada kadar NRL tertentu, kemudian mengalami sedikit penurunan pada kadar NRL yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan deformasi campuran, namun pada kadar yang lebih tinggi pengaruh peningkatan tersebut mulai berkurang. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga variasi nilai flow dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL pada penelitian ini.

4.7.7 Marshall Quotient / MQ RAP+NRL

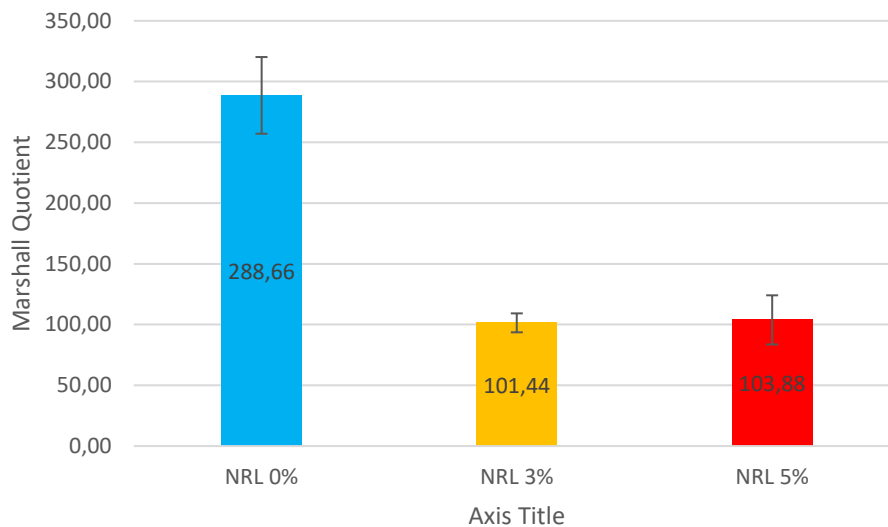


Gambar 4. 21 Grafik MQ

Berdasarkan Gambar 4.21, Penambahan NRL menyebabkan nilai Marshall Quotient cenderung menurun. Penurunan MQ terjadi karena peningkatan flow lebih dominan dibandingkan peningkatan stabilitas. Secara teknis, MQ menunjukkan tingkat kekakuan campuran. Semakin rendah nilai MQ, maka campuran cenderung semakin plastis dan semakin mudah mengalami deformasi.

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 127261x^2 - 10059x + 288,66$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai Marshall Quotient (kg/mm) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai MQ bersifat nonlinier atau mengikuti pola polinomial. Nilai MQ mengalami penurunan yang cukup tajam setelah penambahan NRL, kemudian cenderung meningkat kembali pada kadar NRL yang lebih tinggi, meskipun masih berada di bawah nilai MQ campuran tanpa NRL. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan fleksibilitas campuran, namun pada saat yang sama mengurangi kekakuan campuran yang tercermin dari menurunnya nilai MQ. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga variasi nilai MQ dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL pada penelitian ini.

Pada campuran dengan NRL 3%, stabilitas memang meningkat, tetapi flow juga meningkat cukup besar sehingga MQ menurun. Hal ini menunjukkan bahwa NRL 3% meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban, tetapi pada saat yang sama membuat campuran lebih lentur. Pada kadar NRL 5%, penurunan stabilitas dan tingginya flow menyebabkan MQ menjadi kurang optimal. Dengan demikian, analisis MQ menunjukkan bahwa kadar NRL harus dibatasi agar campuran tetap memiliki keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan. Campuran AC-WC tidak boleh terlalu kaku karena berisiko retak, tetapi juga tidak boleh terlalu plastis karena berisiko deformasi permanen (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022; Khan et al., 2025).



Gambar 4. 22 Diagram MQ

Berdasarkan Gambar 4.22, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Marshall Quotient (MQ) mengalami penurunan yang cukup signifikan. Nilai MQ pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 288,66 kg/mm, kemudian menurun menjadi 101,44 kg/mm pada NRL 3% dan sedikit meningkat menjadi 103,88 kg/mm pada NRL 5%, namun masih jauh lebih rendah dibandingkan campuran tanpa NRL. Penurunan nilai MQ menunjukkan bahwa kekakuan campuran berkurang seiring bertambahnya kadar NRL. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih fleksibel atau plastis akibat pengaruh NRL, sehingga kemampuan campuran dalam menahan deformasi terhadap perubahan flow menjadi lebih rendah.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian MQ. Nilai standar deviasi MQ untuk campuran RAP+NRL sebesar 31,56 kg/mm (0%), 7,79 kg/mm (3%), dan 20,22 kg/mm (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 0% menunjukkan variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan campuran dengan penambahan NRL. Sementara itu, campuran NRL 3% memiliki variasi data paling kecil sehingga menunjukkan hasil pengujian yang lebih konsisten.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Marshall dengan NRL

nomor benda uji	kadar aspal	NRL	BJ maksimum	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji	
					udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan						
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	
1	4,6	0%	2,397	511,0	1176,20	672	1182,67	2,302	3,963	15,732	72,198	108	1034,44	0,036	28300,4	3,61	288,66	0,986	
2	4,6	3%	2,397	522,9	1179,23	660	1182,93	2,255	5,905	17,436	63,261	109	1043,96	0,103	9945,0	10,3	101,44	0,986	
3	4,6	5%	2,397	522,5	1173,93	658	1180,80	2,247	6,249	17,737	61,719	104	996,17	0,099	10184,5	9,87	103,88	0,986	
KETENTUAN BATAS											3-5	MIN.14	MIN. 65		MIN. 1000			2-4	MIN. 250

Sifat-sifat campuran	Standar uji	LTBA B _{RAP}		AC _{RAP}		
		Gradasi halus	Gradasi kasar	WC _{RAP}	BC _{RAP}	Base _{RAP}
Jumlah tumbukan per bidang	ASTM D6926-10	75		75		112 ⁽¹⁾
Rasio abu terhadap aspal	AASHTO M323	0,6--1,6		0,6--1,2		
Rongga dalam campuran (VIM), %	AASHTO M323	3,0--5,0 ⁽²⁾		3,0--5,0 ⁽²⁾		
Rongga dalam mineral agregat (VMA), %	AASHTO M323	Min. 15		Min. 14	Min. 13	Min. 12
Rongga terisi aspal (VFB), %	AASHTO M323	Min. 65				
Stabilitas marshall, kg		Min. 900		Min. 1000		Min. 2250 ⁽¹⁾
Pelelehan, mm	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	2,0--4,5		2,0--4,0		3,0 ⁽¹⁾ --6,0 ⁽¹⁾
Stabilitas marshall sisa, %		Min. 90				
Stabilitas Dinamis, Lintasan / mm ⁽²⁾	JRA-1980	Min. 2000		Min. 2500		

Gambar 4. 23 Ketentuan Spesifikasi Khusus Interim Binamarga 2019

Berdasarkan Tabel 4.15, hasil pengujian Marshall KAO dengan variasi penambahan NRL sebesar 0%, 3%, dan 5% pada kadar aspal optimum 4,60%, diperoleh nilai rata-rata beberapa parameter Marshall, yaitu BJ Bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient. Hasil tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh penambahan NRL terhadap karakteristik campuran beraspal.

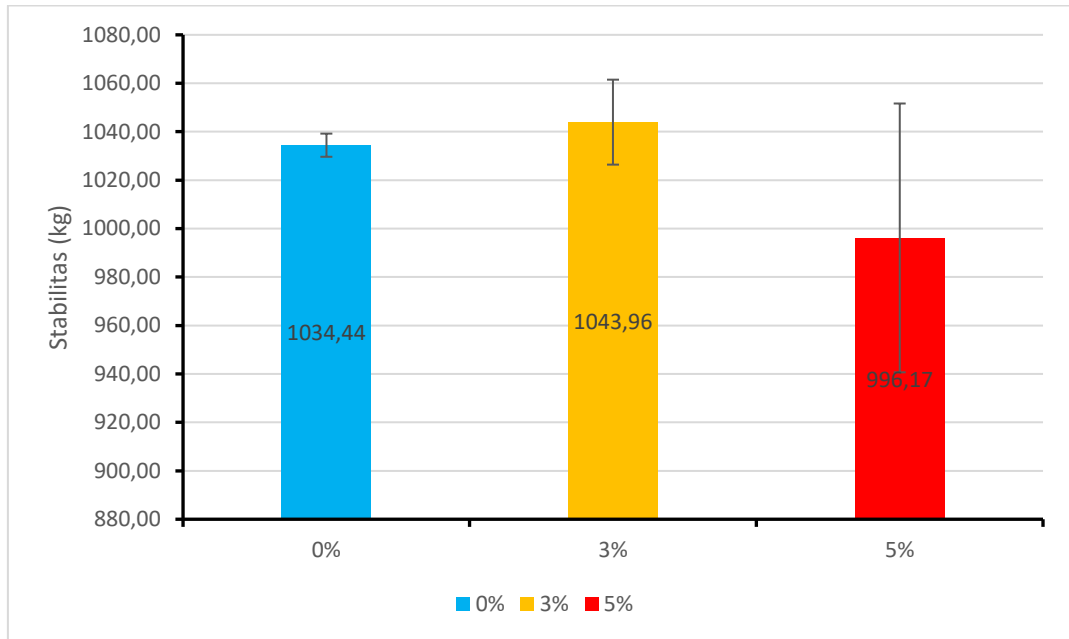
Pada campuran dengan NRL 0%, diperoleh nilai BJ Bulk sebesar 2,302, VIM 3,963%, VMA 15,732%, VFB 72,198%, stabilitas 1034,44 kg, flow 3,61 mm, dan Marshall Quotient 288,66 kg/mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa campuran tanpa penambahan NRL memiliki karakteristik yang cukup baik dan digunakan sebagai campuran pembanding terhadap variasi NRL 3% dan 5%.

Pada penambahan NRL 3%, nilai stabilitas meningkat menjadi 1043,96 kg dan menjadi nilai stabilitas tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Namun, nilai VIM dan flow juga mengalami peningkatan, sedangkan VFB dan Marshall Quotient mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL 3% dapat meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban, tetapi campuran menjadi lebih plastis dan memiliki rongga udara yang lebih besar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas campuran, sehingga deformasi yang terjadi saat menerima beban menjadi lebih besar.

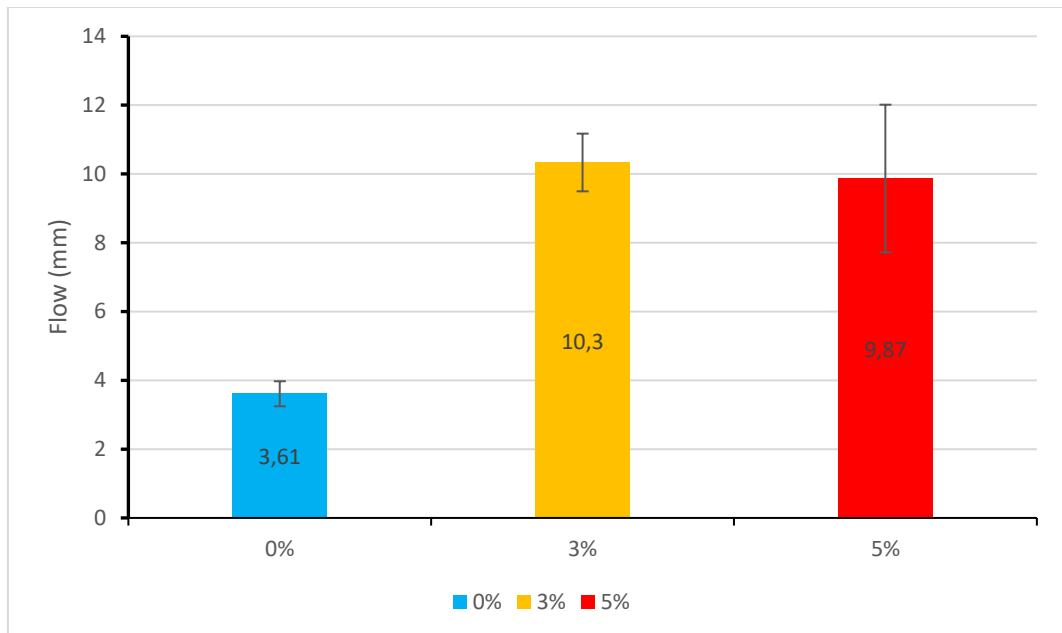
Pada penambahan NRL 5%, nilai BJ Bulk menurun menjadi 2,247, VIM meningkat menjadi 6,249%, dan VFB menurun menjadi 61,719%. Nilai stabilitas juga menurun menjadi 996,17 kg, sedangkan flow masih cukup tinggi sebesar 9,87 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan NRL yang lebih besar cenderung meningkatkan rongga udara, menurunkan rongga yang terisi aspal, serta mengurangi kemampuan campuran dalam menahan beban.

Secara keseluruhan, penambahan NRL memberikan pengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran. Semakin besar kadar NRL yang ditambahkan, nilai BJ Bulk dan VFB cenderung menurun, sedangkan nilai VIM, VMA, dan flow cenderung meningkat. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar NRL 3%, namun peningkatan nilai flow dan penurunan Marshall Quotient menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih

plastis dan kurang kaku. Untuk memperjelas kecenderungan perubahan setiap parameter Marshall, hasil tersebut disajikan dalam dua grafik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan Gambar 4.25



Gambar 4. 24 Grafik Stabilitas Marshall RAP NRL



Gambar 4. 25 Grafik *Flow* Marshall RAP NRL

Berdasarkan Gambar 4.24 dan Gambar 4. 25, hasil pengujian Marshall, terlihat bahwa penambahan NRL memberikan pengaruh yang cukup jelas terhadap karakteristik campuran AC-WC berbasis RAP. Pada parameter volumetrik, nilai VIM dan VMA cenderung meningkat, sedangkan BJ Bulk dan VFB mengalami penurunan. Peningkatan VIM menunjukkan bahwa rongga udara dalam campuran semakin besar, sehingga campuran berpotensi menjadi lebih mudah dimasuki air dan udara apabila melebihi batas spesifikasi. Kondisi tersebut dapat berdampak terhadap penurunan durabilitas campuran dalam jangka panjang. Sementara itu, penurunan VFB menunjukkan bahwa rongga dalam agregat yang terisi aspal menjadi lebih rendah, sehingga dapat memengaruhi kualitas ikatan antara aspal, RAP, agregat, dan NRL.

Pada parameter mekanis, nilai stabilitas meningkat pada kadar NRL 3%, tetapi menurun kembali pada kadar NRL 5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL pada kadar tertentu mampu meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban, namun penambahan yang terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas campuran. Nilai flow yang meningkat cukup tinggi pada campuran dengan penambahan NRL menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih plastis atau lebih mudah mengalami deformasi. Akibatnya, nilai Marshall Quotient menurun, yang menunjukkan bahwa kekakuan campuran berkurang. Dampak dari kondisi ini adalah campuran dengan NRL 3% cenderung memberikan keseimbangan yang lebih baik antara stabilitas dan fleksibilitas, sedangkan campuran dengan NRL 5% cenderung terlalu plastis sehingga kurang optimal dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian Marshall. Nilai deviasi stabilitas untuk campuran RAP+NRL sebesar 4,78 kg pada kadar 0%, 17,54 kg pada kadar 3%, dan 55,49 kg pada kadar 5%, sedangkan deviasi flow sebesar 0,36 mm pada kadar 0%, 0,84 mm pada kadar 3%, dan 2,15 mm pada kadar 5%. Semakin besar nilai deviasi, maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 5% menunjukkan variasi data terbesar, sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan kadar lainnya. Dampaknya terhadap hasil analisis adalah data pada kadar NRL 5% memiliki tingkat konsistensi yang lebih rendah, sehingga hasilnya perlu ditafsirkan secara lebih hati-hati. Dengan demikian,

berdasarkan kecenderungan nilai stabilitas, flow, Marshall Quotient, dan sebaran data, kadar NRL 3% dapat dianalisis sebagai kadar yang lebih efektif dibandingkan 5% karena mampu meningkatkan stabilitas tanpa menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis dan tanpa menghasilkan variasi data yang terlalu besar.

4.8 Hasil Pengujian Cantabro

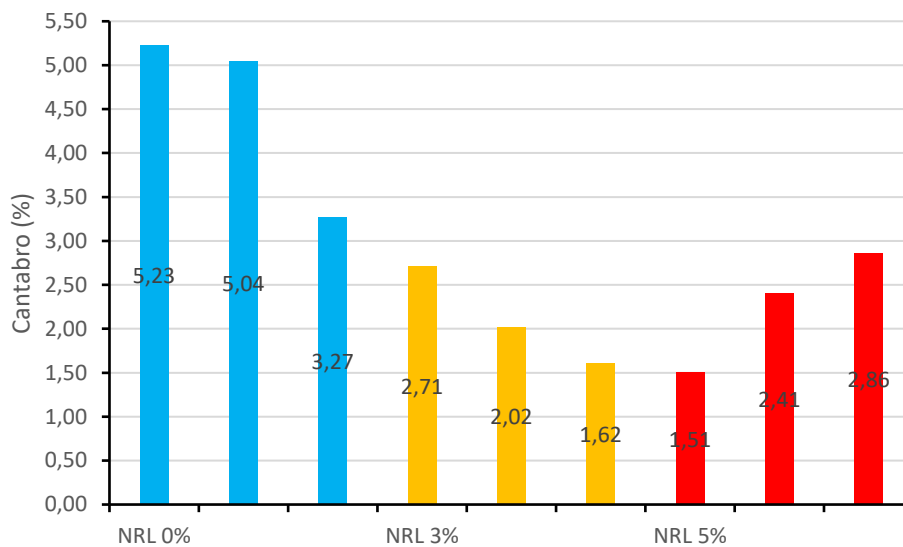
Pengujian Cantabro dilakukan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran akibat gesekan dan benturan. Pengujian ini dilakukan pada campuran dengan variasi NRL 0%, NRL 3%, dan NRL 5%. Nilai Cantabro diperoleh dari persentase kehilangan berat benda uji setelah dilakukan pengujian. Semakin kecil nilai Cantabro yang diperoleh, maka semakin baik ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran.

Hasil pengujian Cantabro pada masing-masing variasi campuran dapat dilihat pada

Tabel 4. 14 Tabel Hasil Pengujian Cantabro

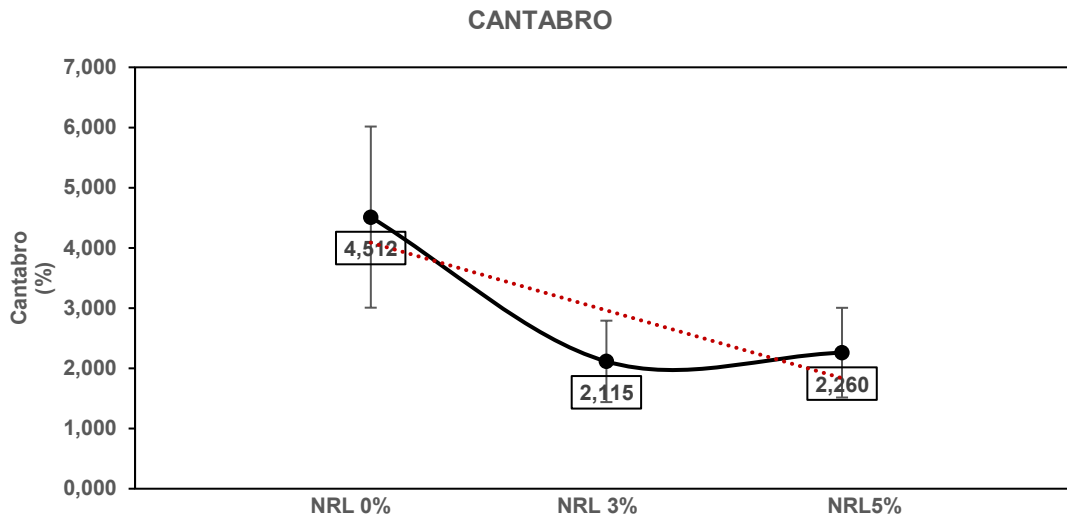
No	Variasi	Kode Sampel	W _{e0}	W _{e30}	W _{e60}	W _{e90}	W _{e120}	W _{e150}	W _{e180}	W _{e210}	W _{e240}	W _{e270}	W _{e300}	W _{Loss}	Cantabro
			(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(gr)	(%)
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
1	NRL 0%	N0 1	1173,00	1159,50	1147,80	1143,00	1135,50	1130,00	1124,40	1120,10	1116,60	1111,70	1111,70	61,30	5,23
		N0 2	1138,20	1127,70	1124,70	1114,00	1110,80	1102,10	1097,80	1090,70	1084,10	1080,80	1080,80	57,40	5,04
		N0 3	1132,70	1126,90	1122,80	1117,80	1110,00	1107,40	1106,20	1105,00	1102,80	1098,10	1095,70	37,00	3,27
Rata-rata														4,51	
2	NRL 3%	N3	1151,30	1144,80	1141,60	1136,90	1134,10	1130,30	1129,10	1127,30	1125,40	1122,00	1120,10	31,20	2,71
		N3	1148,00	1140,20	1137,30	1135,00	1134,50	1131,10	1129,80	1126,30	1125,80	1125,00	1124,80	23,20	2,02
		N3	1139,20	1138,00	1137,40	1136,30	1134,20	1132,10	1130,00	1128,40	1125,40	1122,10	1120,80	18,40	1,62
Rata-rata														2,12	
3	NRL 5%	N5	1136,10	1134,10	1130,90	1128,50	1127,20	1125,60	1124,20	1122,00	1120,90	1120,00	1119,00	17,10	1,51
		N5	1140,00	1137,20	1135,20	1132,80	1130,30	1127,20	1124,10	1120,30	1118,80	1114,20	1112,50	27,50	2,41
		N5	1138,60	1135,40	1131,10	1128,70	1127,60	1122,30	1120,20	1117,30	1114,20	1110,10	1106,00	32,60	2,86
Rata-rata														2,26	

Berdasarkan Tabel 4.14, dapat dilihat bahwa setiap variasi campuran mengalami penurunan berat benda uji selama proses pengujian Cantabro. Penurunan berat tersebut terjadi akibat adanya pelepasan butiran agregat selama benda uji diputar dalam mesin Los Angeles. Besarnya kehilangan berat pada masing-masing variasi kemudian digunakan untuk menentukan nilai Cantabro.

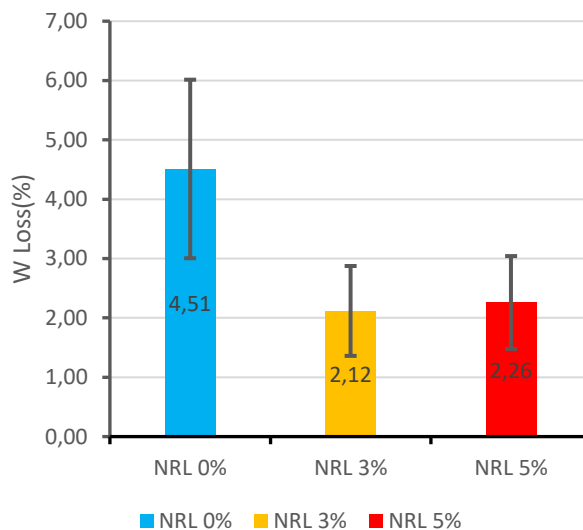


Gambar 4. 26 Diagram Cantabro 3 sampel per kadar NRL

Pengujian Cantabro dilakukan menggunakan tiga benda uji untuk setiap variasi kadar NRL, yaitu NRL 0%, NRL 3%, dan NRL 5%. Nilai kehilangan berat (Cantabro Loss) masing-masing benda uji kemudian dihitung dan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai Cantabro pada setiap variasi campuran. Penggunaan tiga sampel pada setiap kadar NRL bertujuan untuk meningkatkan keandalan hasil pengujian serta memungkinkan analisis variasi data melalui perhitungan standar deviasi dan error bar.



Gambar 4. 27 Hasil Cantabro



Gambar 4. 28 Diagram Cantabro

Berdasarkan Gambar 4.28, terlihat bahwa benda uji pada campuran NRL 0%, NRL 3%, dan NRL 5% mengalami penurunan berat secara bertahap pada setiap interval pengujian. Ketiga benda uji menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu berat benda uji semakin menurun seiring bertambahnya waktu pengujian. Nilai kehilangan berat pada campuran NRL 0% menunjukkan bahwa campuran tanpa penambahan NRL lebih mudah mengalami pelepasan butiran. Hal ini dapat dilihat dari nilai rata-rata Cantabro sebesar 4,51%, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi campuran lainnya. Error bar

menunjukkan nilai standar deviasi dari hasil pengujian pada setiap variasi kadar NRL. Nilai standar deviasi untuk campuran dengan kadar NRL 0%, 3%, dan 5% masing-masing sebesar 1,50%, 0,68%, dan 0,74%.

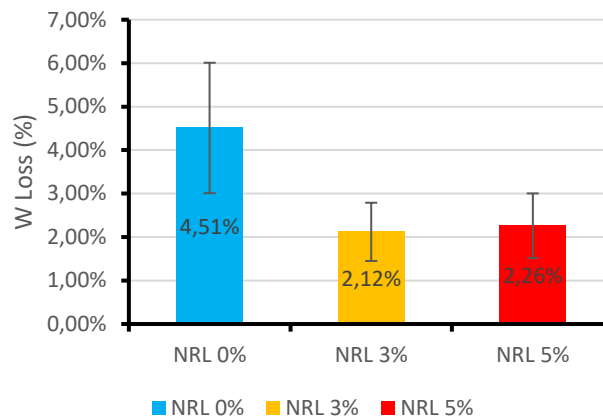
Berdasarkan (British Standards Institution, 2017), nilai kehilangan berat pada pengujian Cantabro harus berada di bawah 40%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran RAP+NRL memiliki nilai Cantabro sebesar 4,51%, 2,12%, dan 2,26%, sehingga seluruh campuran memenuhi persyaratan tersebut. Nilai yang jauh di bawah batas maksimum menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap pelepasan butiran agregat (ravelling) dan cukup tahan terhadap pengaruh abrasi selama masa pelayanan perkerasan.

Semakin besar nilai standar deviasi, semakin besar pula penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 0% memiliki variasi data terbesar yang ditunjukkan oleh error bar paling panjang, sedangkan campuran dengan kadar NRL 3% memiliki variasi terkecil sehingga menghasilkan error bar yang lebih pendek. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengujian Cantabro pada campuran dengan penambahan 3% NRL cenderung lebih konsisten dibandingkan variasi kadar NRL lainnya.

Campuran dengan penambahan NRL 3% juga mengalami penurunan berat pada setiap interval pengujian, namun penurunannya lebih kecil dibandingkan campuran NRL 0%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL 3% mampu meningkatkan daya ikat antara aspal dan agregat, sehingga pelepasan butiran menjadi lebih rendah. Nilai rata-rata Cantabro pada variasi ini sebesar **2,12%**, yang menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gesekan dan benturan.

Campuran dengan penambahan NRL 5% menunjukkan penurunan berat benda uji selama proses pengujian. Nilai kehilangan berat pada variasi ini masih lebih kecil dibandingkan campuran NRL 0%, namun sedikit lebih besar dibandingkan campuran NRL 3%. Nilai rata-rata Cantabro pada campuran NRL 5% sebesar **2,26%**. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL 5% tetap dapat meningkatkan ketahanan

campuran terhadap pelepasan butiran, meskipun hasilnya tidak lebih baik dibandingkan variasi NRL 3%.



Gambar 4. 29 Hasil Rata-rata Cantabro

Berdasarkan Gambar 4.20, nilai Cantabro rata-rata pada campuran NRL 0% sebesar 4,51%, NRL 3% sebesar 2,12%, dan NRL 5% sebesar 2,26%. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai Cantabro mengalami penurunan setelah adanya penambahan NRL. Penurunan nilai Cantabro menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih tahan terhadap pelepasan butiran. Nilai deviasi sebesar 1,50% pada NRL 0%, 0,67% pada NRL 3%, dan 0,74% pada NRL 5% menunjukkan bahwa variasi hasil pengujian paling kecil terjadi pada campuran NRL 3%, sehingga hasilnya lebih seragam dibanding variasi lainnya.

Oleh karena itu, NRL 3% menjadi variasi paling efektif karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara ikatan binder-agregat, kepadatan, dan ketahanan terhadap abrasi. Hal ini sejalan dengan konsep Cantabro Loss sebagai indikator durabilitas dan ketahanan campuran terhadap ravelling, di mana nilai kehilangan massa yang lebih rendah menunjukkan campuran lebih tahan terhadap pelepasan agregat (Abouelsaad & White, 2022a; Carruth et al., 2023; Meena et al., 2024) Sementara itu, pada penambahan NRL 5%, nilai Cantabro mengalami sedikit peningkatan dibandingkan NRL 3%, sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan NRL yang lebih besar tidak selalu menghasilkan nilai kehilangan berat yang lebih kecil.

4.9 Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengetahui perbandingan biaya campuran antara aspal konvensional dan campuran RAP 30% dengan variasi penambahan NRL. Variasi campuran yang dianalisis terdiri dari campuran konvensional, RAP 30% dengan NRL 0%, RAP 30% dengan NRL 3%, dan RAP 30% dengan NRL 5%. Perhitungan biaya dilakukan berdasarkan kebutuhan material, berat material, harga satuan, dan total harga dari masing-masing campuran.

4.9.1 Analisis Biaya Campuran Aspal Konvensional

Pada campuran aspal konvensional, material yang digunakan terdiri dari agregat 3/4", agregat 1/2", pasir, abu batu, dan aspal. Masing-masing material dihitung berdasarkan persentase kebutuhan campuran, berat material, harga satuan dasar, dan total harga. Hasil perhitungan biaya campuran aspal konvensional disajikan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 15 Analisis Harga Aspal Konvensional

ASPAL KONVENSIONAL				
Material	%	Berat	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20%	275,04	Rp320	Rp88,01
Agregat 1/2"	40%	424,02	Rp365	Rp154,77
Pasir	10%	332,34	Rp276	Rp91,73
Abu Batu	30%	114,60	Rp172	Rp19,71
Aspal	5,9	54,00	Rp12.100	Rp653,40
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.007,62

Berdasarkan Tabel 4.17, diperoleh total biaya campuran aspal konvensional sebesar **Rp1.007,62** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran aspal konvensional diperoleh sebesar **Rp839.681**. Nilai ini menjadi pembandingan terhadap campuran RAP 30% dengan penambahan NRL.

4.9.2 Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 0%

Pada campuran RAP 30% dengan NRL 0%, material yang digunakan terdiri dari agregat, pasir, abu batu, RAP, dan aspal tanpa penambahan NRL. Penggunaan RAP pada campuran ini bertujuan untuk menggantikan sebagian material baru, sehingga dapat memengaruhi total biaya campuran. Hasil perhitungan biaya campuran RAP 30% dengan NRL 0% disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 16 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 0%

NRL 0%				
Material	% Material	Massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	55,2	Rp12.100	Rp668
TOTAL BIAYA		1200		Rp884,69

Berdasarkan Tabel 4.18, diperoleh total biaya campuran RAP 30% dengan NRL 0% sebesar **Rp884,69** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran menjadi **Rp737.240**. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan campuran aspal konvensional, karena adanya penggunaan material RAP dalam campuran.

4.9.3 Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 3%

Pada campuran RAP 30% dengan NRL 3%, material yang digunakan hampir sama dengan campuran NRL 0%, tetapi ditambahkan bahan NRL sebesar 3%. Penambahan NRL menyebabkan adanya tambahan biaya material, sehingga total biaya campuran mengalami perubahan. Hasil perhitungan biaya campuran RAP 30% dengan NRL 3% disajikan pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 17 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 3%

NRL 3%				
Material	% material	massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	53,544	Rp12.100	Rp647,88
NRL	3	1,656	Rp23.900	Rp39,58
TOTAL BIAYA		1200		Rp904,23

Berdasarkan Tabel 4.19, diperoleh total biaya campuran RAP 30% dengan NRL 3% sebesar **Rp904,23** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran menjadi **Rp753.524**. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan campuran RAP 30% dengan NRL 0% karena terdapat tambahan bahan NRL dalam campuran.

4.9.4 Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 5%

Pada campuran RAP 30% dengan NRL 5%, kadar NRL yang digunakan lebih besar dibandingkan variasi sebelumnya. Penambahan kadar NRL yang lebih tinggi menyebabkan kebutuhan bahan NRL meningkat, sehingga total biaya campuran juga mengalami peningkatan. Hasil perhitungan biaya campuran RAP 30% dengan NRL 5% disajikan pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 18 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 5%

NRL 5%				
Material	% material	massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	52,44	Rp12.100	Rp634,52
NRL	5	2,76	Rp23.900	Rp65,96
TOTAL BIAYA		1200		Rp917,26

Berdasarkan Tabel 4.20, diperoleh total biaya campuran RAP 30% dengan NRL 5% sebesar **Rp917,26** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran menjadi **Rp764.380**. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan campuran RAP 30% dengan NRL 0% dan NRL 3%, karena jumlah NRL yang digunakan lebih besar.

4.9.5 Analisis Biaya Campuran

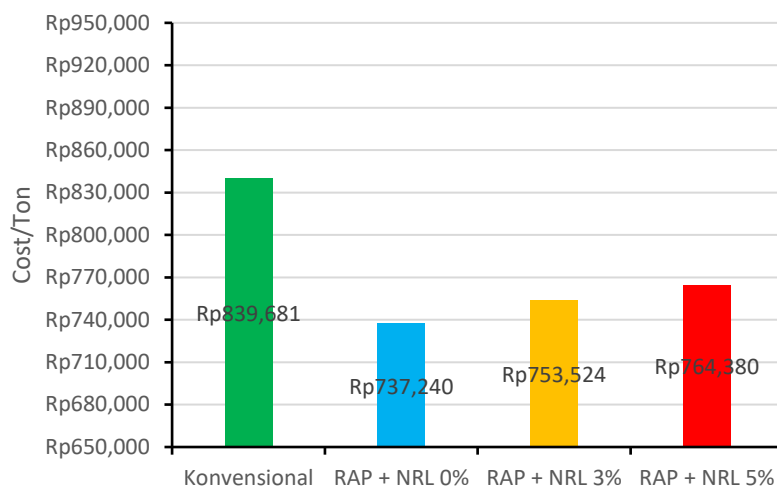
Setelah dilakukan perhitungan biaya pada masing-masing variasi campuran, maka diperoleh biaya campuran yang terdiri dari campuran konvensional, RAP 30% dengan NRL 0%, RAP 30% dengan NRL 3%, dan RAP 30% dengan NRL 5%. biaya campuran disajikan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 19 Rekap Analisis Harga

Jenis Aspal	Berat (gr)	Harga (Rp /gr)	Konversi Ton	Harga (Rp/Ton)
Konvensional	1200	Rp1.007,62	0,833333	Rp839,681
RAP30% + NRL 0%	1200	Rp884,69	0,833333	Rp737,240
RAP30% + NRL 3%	1200	Rp904,23	0,833333	Rp753,524
RAP30% + NRL 5%	1200	Rp917,26	0,833333	Rp764,380

Berdasarkan Tabel 4.21, biaya campuran aspal konvensional sebesar **Rp839.681**, RAP 30% dengan NRL 0% sebesar **Rp737.240**, RAP 30% dengan NRL 3% sebesar **Rp753.524**, dan RAP 30% dengan NRL 5% sebesar **Rp764.380**. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa campuran RAP 30% memiliki biaya yang lebih rendah dibandingkan campuran aspal konvensional. Namun, penambahan NRL menyebabkan biaya campuran RAP 30% mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar NRL.

Dari rekap analisis harga didapatkan yaitu grafik analisis biaya digunakan untuk memperjelas perbandingan biaya dari setiap variasi campuran. Grafik ini menunjukkan perbedaan biaya antara campuran konvensional, RAP 30% dengan NRL 0%, RAP 30% dengan NRL 3%, dan RAP 30% dengan NRL 5%. Grafik analisis biaya disajikan pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 30 Grafik Analisis Biaya

Berdasarkan Gambar 4. 30, terlihat bahwa biaya tertinggi terdapat pada campuran aspal konvensional, sedangkan biaya terendah terdapat pada campuran RAP 30% dengan NRL 0%. Campuran RAP 30% dengan penambahan NRL 3% dan 5% mengalami peningkatan biaya dibandingkan campuran RAP 30% tanpa NRL. Hal ini terjadi karena adanya tambahan biaya bahan NRL pada campuran. Grafik analisis biaya disajikan tanpa error bar karena nilai biaya diperoleh dari hasil perhitungan komposisi material dan bukan berasal dari pengujian berulang, sehingga tidak dilakukan analisis standar deviasi maupun standard error.

Meskipun demikian, campuran RAP 30% dengan NRL 3% masih lebih murah dibandingkan campuran konvensional dan memberikan kinerja teknis yang lebih baik terhadap ketahanan Cantabro. Oleh karena itu, dari sudut pandang teknik sipil, variasi NRL 3% dapat dinilai lebih efektif karena tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap pelepasan butiran, tetapi juga tetap memberikan efisiensi biaya dibandingkan campuran tanpa RAP. Hal ini mendukung manfaat penelitian, yaitu mengoptimalkan pemanfaatan RAP, mengurangi potensi kerusakan ravelling, serta mendukung penggunaan material lokal berupa karet alam dalam konstruksi jalan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Suwanto et al., 2023; Widayanti et al., 2020).

4.10 Analisis Hasil Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter stabilitas dipengaruhi oleh penambahan *Natural Rubber Latex* (NRL) pada campuran AC-WC yang mengandung 30% *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Campuran dengan kadar NRL sebesar 0% dan 3% masih memenuhi persyaratan minimum stabilitas berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu sebesar 1.000 kg. Sebaliknya, campuran dengan kadar NRL 5% menghasilkan nilai stabilitas di bawah batas yang dipersyaratkan sehingga tidak memenuhi spesifikasi. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan NRL dalam kadar yang lebih tinggi dapat menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban.

Pada parameter *Flow*, hanya campuran dengan kadar NRL 0% yang memenuhi rentang nilai yang dipersyaratkan, yaitu 2–4 mm. Sementara itu, campuran dengan kadar NRL 3% dan 5% menghasilkan nilai *Flow* yang melebihi batas spesifikasi yaitu 10,3 mm dan 9,87 mm. Peningkatan nilai *Flow* tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan sifat elastisitas dan fleksibilitas binder sehingga campuran mengalami deformasi yang lebih besar ketika menerima pembebanan. Kondisi ini mencerminkan bahwa peningkatan kelenturan campuran tidak selalu diikuti oleh peningkatan kinerja mekanis sesuai dengan persyaratan teknis.

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) juga menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya kadar NRL. Hanya campuran tanpa penambahan NRL yang memenuhi persyaratan minimum MQ, sedangkan campuran dengan kadar NRL 3% dan 5% tidak memenuhi spesifikasi. Penurunan nilai MQ dipengaruhi oleh meningkatnya nilai *Flow* serta menurunnya kekakuan campuran, sehingga kemampuan campuran dalam mempertahankan stabilitas terhadap deformasi menjadi berkurang.

Secara keseluruhan, penggunaan RAP sebesar 30% yang dikombinasikan dengan penambahan NRL memberikan pengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Variasi tanpa penambahan NRL 0% menunjukkan kinerja terbaik karena seluruh parameter Marshall memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Sebaliknya, penambahan NRL sebesar 3% dan 5% mampu meningkatkan fleksibilitas campuran, namun mengakibatkan beberapa parameter, terutama *Void Filled with Bitumen* (VFB), *Flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ), tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Oleh

karena itu, diperlukan upaya optimasi terhadap kadar NRL maupun proses pencampuran agar diperoleh campuran yang memiliki keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi terhadap komposisi job mix, khususnya pada proporsi agregat halus dan kadar NRL, agar diperoleh keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran. Dominasi fraksi agregat halus pada campuran diduga turut memengaruhi karakteristik Marshall, terutama terhadap nilai *Flow*, *Void Filled with Bitumen* (VFB), dan *Marshall Quotient* (MQ), sehingga beberapa parameter belum memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Selain itu, penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan pengujian Cantabro Loss guna mengevaluasi ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran (*raveling*) akibat penambahan NRL. Pengujian tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja campuran beraspal modifikasi RAP dan NRL, terutama dari aspek durabilitas dan ketahanan terhadap kerusakan di lapangan.