

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Pengujian Kelayakan Material

4.1.1 Aspal

Setelah melakukan pengujian kelayakan material aspal Pen 60/70 berdasarkan Tabel 4.1, hasil pengujian karakteristik aspal Pen 60/70 menunjukkan bahwa seluruh parameter pengujian mengacu pada standar yang disyaratkan. Data hasil pengujian secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A.

Tabel 4. 1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Standar Pengujian	Satuan	Keterangan
1.	Berat Jenis	1,03	SNI 2441:2011	Min. 1,00	-	Memenuhi
2.	Penetrasi	62,6	SNI 2456:2011	60 – 70	0,1 mm	Memenuhi
3.	Titik Lembek	56	SNI 2434:2011	Min. 48	°C	Memenuhi
4.	Daktilitas	82,8	SNI 2432:2011	Min. 100	cm	Tidak Memenuhi

a. Pengujian Berat Jenis

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis aspal yang ditampilkan pada Tabel 4.1, diperoleh nilai rata – rata berat jenis aspal sebesar 1,03. Nilai berat jenis aspal diperoleh dari perbandingan antara berat aspal terhadap volume aspal yang dihitung menggunakan piknometer. Hasil pengujian yang menggunakan standar SNI 2441:2011 menunjukkan bahwa nilai berat jenis aspal yang diperoleh masih berada pada kisaran normal untuk aspal penetrasi 60/70 sehingga aspal dapat dikatakan memenuhi standar dengan berat jenis minimal 1,00. Selain itu, perbedaan hasil antara pengujian pertama dan kedua tidak terlalu besar sehingga hasil pengujian dapat

dinyatakan cukup konsisten dan memiliki tingkat ketelitian yang baik. Data hasil pengujian berat jenis aspal dapat dilihat pada Lampiran A.1.

b. Pengujian Penetrasi

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian penetrasi, didapatkan nilai toleransi sebesar 4 yang sesuai pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Toleransi Penetrasi Aspal

Hasil penetrasi (mm)	0 - 49	50 - 149	150 - 249	250 - 500
Toleransi (mm)	2	4	12	20

Bedasarkan pada tabel 4.1 nilai penetrasi rata-rata sebesar 62,6 mm. Hasil pengujian yang menggunakan standar SNI 2456:2011 dengan ketentuan hasil kisaran 60 – 70 x 0,1mm menunjukkan bahwa aspal yang digunakan termasuk dalam klasifikasi aspal penetrasi 60/70, sehingga masih sesuai untuk digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran perkerasan jalan. Nilai penetrasi menggambarkan tingkat kekerasan atau konsistensi aspal, dimana semakin besar nilai penetrasi maka aspal akan semakin lunak, sedangkan semakin kecil nilai penetrasi menunjukkan aspal yang lebih keras.

Selain itu, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa selisih nilai penetrasi antar pengujian masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan berdasarkan standar pengujian, yaitu sebesar 4 mm untuk rentang penetrasi 50–149 mm. Dengan demikian, hasil pengujian penetrasi yang diperoleh dapat dinyatakan valid dan memenuhi ketentuan pengujian yang berlaku. Data hasil pengujian penetrasi dapat dilihat pada Lampiran A.2.

c. Pengujian Titik Lembek

Berdasarkan hasil pengujian titik lembek aspal yang ditampilkan pada Tabel 4.1, diperoleh nilai rata-rata titik lembek sebesar 56°C. Hasil pengujian yang menggunakan standar SNI 2434:2011 dengan ketentuan hasil minimal 48°C. Nilai titik lembek menunjukkan suhu dimana aspal mulai mengalami perubahan dari kondisi padat menjadi lebih lunak akibat pengaruh kenaikan temperatur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal yang digunakan

memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mempertahankan kekakuannya pada suhu tinggi sehingga dapat mengurangi potensi terjadinya *bleeding* atau perubahan bentuk pada perkerasan jalan. Data hasil pengujian titik lembek dapat dilihat pada Lampiran A.3.

d. Pengujian Daktilitas

Berdasarkan hasil pengujian titik lembek aspal yang ditampilkan pada Tabel 4.1, diperoleh nilai rata-rata daktilitas sebesar 82,8 cm. Hasil pengujian yang menggunakan standar SNI 2432:2011 dengan ketentuan hasil minimal 100 cm. Hasil nilai rata – rata tersebut menunjukkan bahwa aspal yang digunakan memiliki kemampuan meregang sebelum putus yang cukup baik. Semakin tinggi nilai daktilitas, maka kemampuan aspal untuk mengalami deformasi tanpa mengalami retak akan semakin baik, sehingga aspal lebih tahan. Data hasil pengujian daktilitas dapat dilihat pada Lampiran A.4.

4.1.2 Agregat Kasar

Setelah melakukan pengujian kelayakan material agregat kasar berdasarkan Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, hasil pengujian karakteristik agregat kasar menunjukkan bahwa seluruh parameter pengujian mengacu pada standar yang disyaratkan. Data hasil pengujian secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran B.

a. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Berdasarkan pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar maka diperoleh hasil:

Tabel 4. 3 Rekapitulasi Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

No.	Pengujian Agregat	Standar Pengujian	BJ <i>Bulk</i>	BJ SSD	BJ Semu	Penyerapan Air (%)
1.	Agregat kasar lolos saringan no. $\frac{3}{4}$	SNI 1969:2016	2,44	2,53	2,51	3,89
2.	Agregat kasar lolos saringan no. $\frac{1}{2}$	SNI 1969:2016	2,71	2,77	2,42	2,31

Berdasarkan Tabel 4.3, pengujian berat jenis dan penyerapan agregat

kasar dilakukan mengacu pada SNI 1969:2016. Parameter yang diperoleh meliputi berat jenis bulk, berat jenis SSD, berat jenis semu, dan penyerapan air. Hasil penyerapan air dibandingkan dengan batas spesifikasi maksimum 3% untuk mengetahui kelayakan agregat kasar sebagai bahan penyusun campuran aspal.

Berdasarkan hasil tersebut, agregat kasar lolos saringan $\frac{1}{2}$ dinyatakan memenuhi persyaratan penyerapan air, sedangkan agregat kasar lolos saringan $\frac{3}{4}$ belum memenuhi karena nilai penyerapannya melebihi batas maksimum 3%. Nilai penyerapan yang tinggi dapat menunjukkan bahwa agregat memiliki pori yang lebih besar, sehingga perlu diperhatikan dalam perencanaan campuran aspal karena dapat memengaruhi kebutuhan aspal dan daya ikat campuran. Data hasil pengujian berat jenis dapat dilihat pada Lampiran B.1.

b. Pengujian Gradasi Agregat

Berdasarkan pengujian analisis saringan maka diperoleh hasil:

Tabel 4. 4 Rekapitulasi Hasil Uji Gradasi Agregat Kasar

No.	Ukuran Saringan	Agregat Kasar $\frac{3}{4}$ Lolos (%)	Agregat Kasar $\frac{1}{2}$ Lolos (%)	Spesifikasi Gradasi AC-WC
1.	3/4"	100	100	100
2.	1/2"	71,35	100,00	90-100
3.	3/8"	59,95	76,42	77-90
4.	#4	28,40	42,93	53-69
5.	#8	3,32	18,07	33-53
6.	#16	2,71	5,14	21-40
7.	#30	2,30	5,07	14-30
8.	#50	2,26	4,87	9-22
9.	#100	2,23	3,37	6-15
10	#200	1,54	2,50	4-9
11.	PAN	0,00	0,00	0

Berdasarkan Tabel 4.4, hasil pengujian analisis saringan agregat kasar yang mengacu pada SNI ASTM C136:2012, diperoleh nilai persentase lolos pada

dua jenis fraksi agregat, yaitu agregat kasar 3/4" lolos dan agregat kasar 1/2" lolos. Hasil pengujian gradasi agregat kasar, diketahui bahwa agregat kasar 3/4" lolos dan agregat kasar 1/2" lolos belum memenuhi seluruh rentang spesifikasi gradasi AC-WC apabila digunakan secara terpisah. Hal ini terlihat dari beberapa ukuran saringan yang memiliki persentase lolos di bawah batas minimum spesifikasi. Oleh karena itu, diperlukan penggabungan beberapa fraksi agregat agar gradasi campuran memenuhi spesifikasi yang disyaratkan. Data hasil pengujian analisis saringan dapat dilihat pada Lampiran B.2.

4.1.3 Agregat Halus

Setelah melakukan pengujian kelayakan material agregat halus berdasarkan Tabel 4.5 dan Tabel 4.6, hasil pengujian karakteristik agregat halus menunjukkan bahwa seluruh parameter pengujian mengacu pada standar yang disyaratkan. Data hasil pengujian secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran C.

a. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Berdasarkan pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus maka diperoleh hasil:

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

No.	Pengujian Agregat	Standar Pengujian	BJ <i>Bulk</i>	BJ SSD	BJ Semu	Penyerapan Air (%)
1.	Pasir	SNI 1969:2016	2,73	2,97	2,61	8,52
2.	Abu Batu	SNI 1969:2016	2,76	2,88	2,54	4,49

Berdasarkan Tabel 4.5, pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar dilakukan mengacu pada SNI 1969:2016. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus, pasir dan abu batu memiliki nilai berat jenis yang masih dapat digunakan sebagai data perhitungan volumetrik campuran. Namun, nilai penyerapan air kedua material tersebut cukup tinggi, terutama pada pasir sebesar 8,52%. Oleh karena itu, penggunaan agregat halus

tersebut perlu diperhatikan dalam perencanaan campuran karena dapat memengaruhi kadar aspal, daya ikat campuran, dan kebutuhan bahan pengikat. Data hasil pengujian berat jenis dapat dilihat pada Lampiran C.1.

b. Pengujian Gradasi Agregat

Berdasarkan pengujian analisis saringan maka diperoleh hasil:

Tabel 4. 6 Rekapitulasi Hasil Uji Gradasi Agregat Halus

No.	Ukuran Saringan	Pasir Lolos (%)	Abu Batu Lolos (%)	Spesifikasi Gradasi AC-WC
1.	3/4"	100	100	100
2.	1/2"	100	100,00	90-100
3.	3/8"	100	100,00	77-90
4.	#4	100	100,00	53-69
5.	#8	93,47	82,46	33-53
6.	#16	81,23	67,82	21-40
7.	#30	53,86	41,49	14-30
8.	#50	30,54	27,23	9-22
9.	#100	14,50	17,27	6-15
10	#200	12,22	11,35	4-9
11.	PAN	0,00	0,00	0

Berdasarkan Tabel 4.6, hasil pengujian analisis saringan agregat kasar yang mengacu pada SNI ASTM C136:2012. hasil uji gradasi agregat halus, pasir dan abu batu memiliki persentase lolos yang tinggi pada sebagian besar ukuran saringan, terutama mulai dari saringan No. 8 hingga No. 200. Hal ini menunjukkan bahwa kedua material memiliki gradasi yang cenderung halus dan belum memenuhi spesifikasi AC-WC apabila digunakan secara terpisah. Oleh karena itu, diperlukan penggabungan dengan fraksi agregat kasar dan material lain untuk memperoleh gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi campuran AC-WC. Data hasil pengujian analisis saringan dapat dilihat pada Lampiran C.2.

4.1.4 RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*)

a. Ekstraksi Aspal RAP

Setelah melakukan pengujian ekstraksi aspal pada RAP maka didapatkan data yang ditampilkan pada Tabel 4.7 dan 4.8.

Tabel 4. 7 Hasil Ekstraksi aspal RAP Benda Uji 1

NO.	Benda Uji 1			
1	W benda uji	=	1000	gr
2	W penyaring	=	29,1	gr
3	W benda uji + penyaring	=	1029,1	gr
4	W mineral + penyaring	=	985	gr
5	W aspal	=	44,1	gr
6	Kadar Aspal	=	4,41	%

Tabel 4. 8 Hasil Ekstraksi aspal RAP Benda Uji 2

NO.	Benda Uji 2			
1	W benda uji	=	1000	gr
2	W penyaring	=	29,4	gr
3	W benda uji + penyaring	=	1029,4	gr
4	W mineral + penyaring	=	984	gr
5	W aspal	=	45,4	gr
6	Kadar Aspal	=	4,54	%

Dari kedua data benda uji pada tabel 4.10 dan 4.11 diperoleh rata rata

sebagai berikut: $\frac{\text{Benda uji 1} + \text{Benda Uji 2}}{2} = \frac{4,41 + 4,54}{2} = 4,475\%$

Berdasarkan hasil pengujian ekstraksi RAP yang mengacu pada SNI 03-6894-2002, diperoleh kadar aspal rata-rata sebesar 4,475%. Standar tersebut digunakan sebagai metode pengujian untuk menentukan kadar aspal dalam campuran beraspal, namun tidak menetapkan batas minimum atau maksimum kadar aspal hasil ekstraksi. Oleh karena itu, nilai 4,475% digunakan sebagai data kadar aspal lama yang terkandung dalam material RAP dan menjadi dasar dalam perencanaan kebutuhan aspal baru pada campuran AC-WC RAP. Nilai tersebut perlu diperhitungkan dalam perencanaan campuran agar penambahan aspal baru tidak berlebihan dan kadar aspal total campuran tetap sesuai dengan kadar aspal rencana atau KAO.

b. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat RAP

Berdasarkan pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar dan halus RAP maka diperoleh hasil pada Tabel 4.9:

Tabel 4. 9 Rekapitulasi Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar dan Halus RAP

No	Pengujian Agregat	Standar Pengujian	BJ Bulk	BJ SSD	BJ Semu	Penyerapan Air (%)
1.	Agregat kasar RAP tertahan saringan no. 3/8	SNI 1969:2016	2,40	2,44	2,50	1,65
2.	Agregat kasar RAP lolos saringan no. 3/8	SNI 1969:2016	2,71	2,77	2,88	2,16
2.	Agregat halus RAP lolos saringan no. 4	SNI 1969:2016	2,43	2,21	2,29	3,10

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat RAP pada Tabel 4.9, diperoleh tiga jenis material hasil pemisahan, yaitu agregat kasar RAP tertahan saringan No. 3/8, agregat kasar RAP lolos saringan No. 3/8, dan agregat halus RAP lolos saringan No. 4. Pengujian ini mengacu pada SNI 1969:2016. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat RAP, sebagian besar material RAP memiliki nilai penyerapan air yang masih memenuhi batas spesifikasi maksimum 3%. Agregat kasar RAP tertahan saringan No. 3/8 memiliki nilai penyerapan air sebesar 1,65%, sedangkan agregat kasar RAP lolos saringan No. 3/8 memiliki nilai penyerapan air sebesar 2,16%. Kedua nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum, sehingga memenuhi persyaratan. Namun, agregat halus RAP lolos saringan No. 4 memiliki nilai penyerapan air sebesar 3,10%, sehingga sedikit melebihi batas maksimum 3%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat halus RAP memiliki kemampuan menyerap air yang lebih tinggi dan perlu diperhatikan dalam perencanaan campuran aspal, terutama karena dapat

memengaruhi kebutuhan aspal dan sifat volumetrik campuran. Data hasil pengujian berat jenis agregat RAP dapat dilihat pada Lampiran D.1.

c. Pengujian Gradasi Agregat RAP

Berdasarkan pengujian gradasi agregat kasar dan halus RAP maka diperoleh hasil:

Tabel 4. 10 Rekapitulasi Hasil Uji Gradasi Agregat RAP

No.	Ukuran Saringan	RAP Tertahan no. 3/8 (%)	RAP Lolos no. 3/8 (%)	RAP Lolos no. 4 (%)	Spesifikasi Gradasi AC-WC
1.	3/4"	100	100	100	100
2.	1/2"	41,80	100,00	100,00	90-100
3.	3/8"	0,82	99,22	100,00	77-90
4.	#4	0,82	0,05	100,00	53-69
5.	#8	0,82	0,05	42,44	33-53
6.	#16	0,82	0,05	13,04	21-40
7.	#30	0,82	0,05	7,60	14-30
8.	#50	0,82	0,05	2,91	9-22
9.	#100	0,82	0,05	0,74	6-15
10.	#200	0,82	0,05	0,04	4-9
11.	PAN	0,00	0,00	0,00	0

Berdasarkan Tabel 4.10, hasil pengujian analisis saringan agregat kasar yang mengacu pada SNI ASTM C136:2012. Hasil pengujian menunjukkan bahwa masing-masing fraksi RAP belum memenuhi seluruh batas gradasi AC-WC apabila digunakan secara terpisah. Fraksi RAP tertahan No. 3/8 cenderung sangat kasar, fraksi RAP lolos No. 3/8 didominasi ukuran menengah, sedangkan fraksi RAP lolos No. 4 mengandung butiran halus tetapi belum cukup memenuhi batas gradasi pada saringan halus. Oleh karena itu, material RAP perlu dikombinasikan dengan agregat baru, seperti agregat kasar, pasir, abu batu, atau filler, agar gradasi gabungan campuran

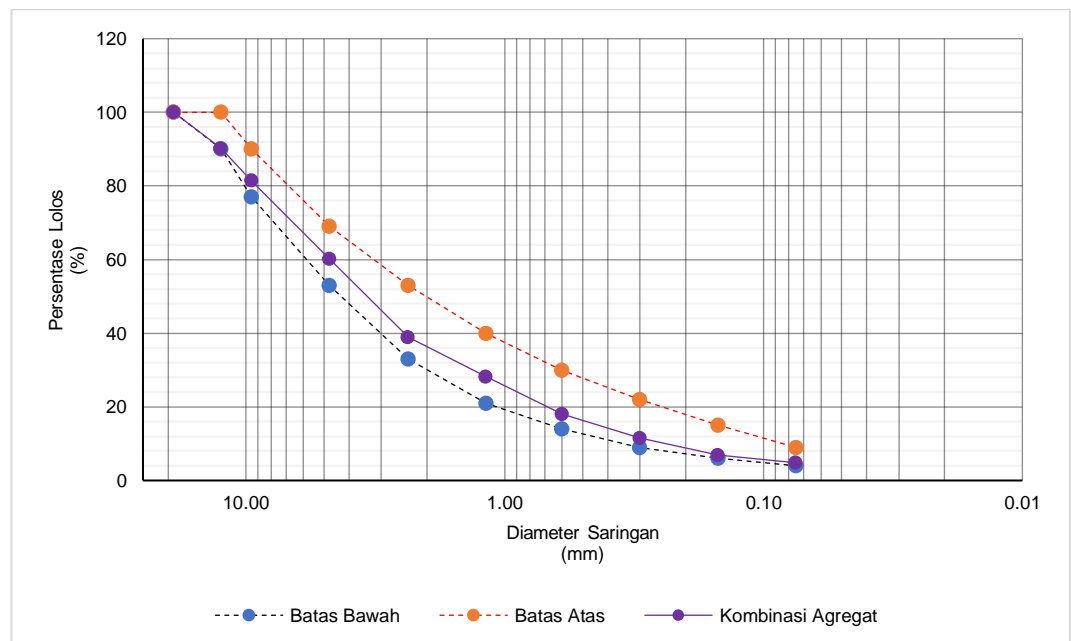
dapat memenuhi spesifikasi AC-WC. Data hasil pengujian analisis saringan dapat dilihat pada Lampiran D.2.

4.2 Analisis Hasil KAO Aspal dengan RAP

4.2.1 Analisis Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan RAP

A. Job mix Design

Pembuatan *job mix design* merupakan langkah awal dalam perencanaan campuran sebelum pelaksanaan pembuatan benda uji. Data yang diperoleh dari pengujian analisis saringan selanjutnya diolah untuk menentukan kombinasi agregat yang menghasilkan gradasi optimum sesuai ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Hasil perhitungan dan kombinasi gradasi agregat yang memenuhi batas amplop spesifikasi ditampilkan pada Gambar 4.1 dan Tabel 4.11.



Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Gabungan

Berdasarkan grafik gradasi gabungan pada Gambar 4.1, kurva kombinasi agregat berada di antara amplop batas bawah serta amplop batas atas spesifikasi gradasi Laston AC-WC. Hal ini menunjukkan bahwa proporsi agregat dan RAP yang digunakan telah menghasilkan distribusi ukuran butir yang sesuai dengan spesifikasi. Gradasi gabungan yang

memenuhi spesifikasi sangat penting karena berpengaruh terhadap kepadatan campuran, rongga udara, stabilitas, dan kemampuan campuran dalam menerima beban lalu lintas. Dengan demikian, kombinasi agregat tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan campuran AC-WC RAP.

Namun demikian, pada tahap awal perencanaan campuran dilakukan perubahan job mix hingga tiga kali karena hasil pengujian *Marshall* belum memenuhi persyaratan, terutama pada parameter stabilitas dan flow. Meskipun gradasi agregat masih berada dalam batas spesifikasi yang diizinkan, hasil tersebut memunculkan hipotesis bahwa kegagalan campuran tidak hanya dipengaruhi oleh pemenuhan amplop gradasi, tetapi juga oleh distribusi fraksi agregat dalam campuran. Pada job mix awal, proporsi agregat halus cenderung lebih dominan dibandingkan agregat kasar sehingga campuran menjadi lebih rapat pada fraksi halus dan kurang memiliki interlocking antar agregat kasar. Kondisi ini diduga menyebabkan campuran memiliki kekakuan dan daya dukung yang lebih rendah, yang ditunjukkan oleh nilai stabilitas yang tidak memenuhi spesifikasi serta nilai flow yang relatif tinggi. Oleh karena itu, dilakukan beberapa penyesuaian komposisi agregat hingga diperoleh gradasi yang mampu menghasilkan karakteristik *Marshall* yang lebih baik dan sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan.

Tabel 4. 11 Proporsi Kombinasi Material

No.	Material	Proporsi Campuran (%)
1.	Agregat 3/4"	20
2.	Agregat 1/2"	15
3.	Pasir No. 4	10
4.	Abu Batu No. 4	25
5.	RAP >9,5	7
6.	RAP 9,5-4	10
7.	RAP <4	13
8.	Total	100

Berdasarkan hasil proporsi kombinasi material pada Tabel 4.11, diperoleh komposisi campuran yang terdiri dari agregat baru sebesar 70% dan material RAP sebesar 30%. Proporsi tersebut disusun untuk

menghasilkan gradasi gabungan yang memenuhi spesifikasi AC-WC berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 Divisi 6 Perkerasan Aspal. Agregat kasar berfungsi membentuk struktur utama campuran, agregat halus dan abu batu berfungsi mengisi rongga antar butir, sedangkan RAP digunakan sebagai material daur ulang untuk mengurangi penggunaan agregat baru. Dengan total proporsi 100%, campuran ini dapat digunakan sebagai dasar perencanaan benda uji AC-WC RAP. Data lengkap proporsi material dapat dilihat pada Lampiran E.1

Tabel 4. 12 *Job Mix Design Marshall* Dengan Uji Kadar Aspal dan RAP

Material	Kadar Aspal					Berat Total (gr)
	3,50%	4%	4,50%	5%	5,50%	
Agregat $\frac{3}{4}$	231,6	230,4	229,2	228	226,8	3438
Agregat $\frac{1}{2}$	173,6	172,8	171,9	171	170,1	2578,2
Abu Batu	115,8	115,2	114,6	114	113,4	1719
Pasir	289,5	288	286,5	285	283,5	4297,5
RAP > 3/8	81,06	80,64	80,22	79,8	79,38	1203,3
RAP < 3/8 dan > 4	115,8	115,2	114,6	114	113,4	1719
RAP < 4	150,54	149,76	148,98	148,2	147,42	2234,7
Kadar Aspal	42	48	54	60	66	810
Jumlah Benda Uji	3	3	3	3	3	15
Berat total benda uji	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Sebelum dilakukan pengujian *Marshall*, terlebih dahulu disusun *Job mix Design* untuk menentukan kebutuhan material pada setiap variasi kadar aspal. Campuran direncanakan dengan berat total benda uji sebesar 1.200 gram dan menggunakan material RAP sebesar 30% dari total campuran. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, dan 5,5%, dengan masing-masing variasi dibuat sebanyak 3 benda uji. Material penyusun campuran terdiri dari agregat $\frac{3}{4}$ ", agregat $\frac{1}{2}$ ", abu batu, pasir, RAP dengan beberapa fraksi ukuran, dan aspal Pen 60/70. Perencanaan *job mix* ini menjadi dasar dalam pembuatan benda uji *Marshall* untuk memperoleh nilai stabilitas, *flow*, VIM, VMA, VFB, dan *Marshall Quotient*, serta menentukan kadar aspal optimum pada campuran AC-WC

RAP. Data hasil perhitungan *Marshall* dengan kadar aspal dapat dilihat pada Lampiran E.2.

B. Hasil Perhitungan Parameter *Marshall*

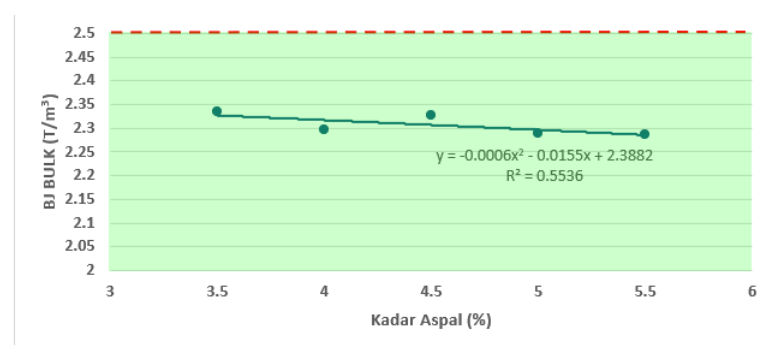
Hasil dari pengolahan data pengujian *Marshall* diubah menjadi bentuk grafik hubungan antara kadar aspal dengan parameter hasil pengujian *Marshall*. Berikut penjelasan mengenai hasil perhitungan parameter *Marshall*.

1. BJ *Bulk* Campuran

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai berat jenis bulk (*Bulk Specific Gravity*) campuran yang berbeda. Nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 13 Rekapitulasi BJ *Bulk* Campuran

Kadar Aspal (%)	BJ Bulk Campuran	Standar	Keterangan
3,5	2,334	<2,5 T/m ³	Memenuhi
4	2,297	<2,5 T/m ³	Memenuhi
4,5	2,327	<2,5 T/m ³	Memenuhi
5	2,290	<2,5 T/m ³	Memenuhi
5,5	2,286	<2,5 T/m ³	Memenuhi



Gambar 4. 2 BJ *Bulk* Campuran Aspal RAP

Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.2 dapat dijelaskan bahwa nilai berat jenis maksimum campuran pada kadar aspal 3,5% hingga 5,5% masih memenuhi ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu memiliki nilai kurang dari 2,5 T/m³ pada setiap variasi kadar aspal. Hal ini menunjukkan bahwa campuran aspal yang digunakan masih berada dalam batas kepadatan yang disyaratkan sehingga material

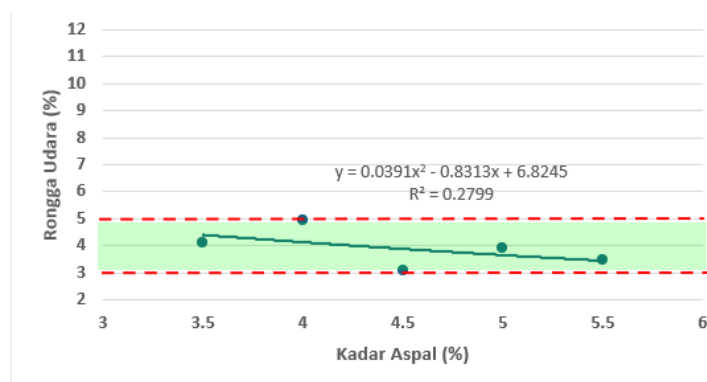
penyusun campuran mampu membentuk struktur yang cukup baik dan stabil. Selain itu, peningkatan kadar aspal pada campuran juga menyebabkan nilai berat jenis campuran cenderung meningkat secara bertahap akibat rongga udara dalam campuran mulai terisi oleh aspal, sehingga campuran menjadi lebih padat dan homogen.

2. Rongga Udara (VIM)

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai rongga udara (*Voids in Mix/VIM*) yang berbeda-beda. Nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 14 Rekapitulasi Rongga Udara

Kadar Aspal (%)	Rongga Udara	Standar	Keterangan
3,5	4,121	3-5%	Memenuhi
4	4,943	3-5%	Memenuhi
4,5	3,061	3-5%	Memenuhi
5	3,915	3-5%	Memenuhi
5,5	3,438	3-5%	Memenuhi



Gambar 4. 3 Rongga Udara Aspal RAP

Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.14 dan Gambar 4.3 dapat dijelaskan bahwa nilai rongga udara dalam campuran VIM pada kadar aspal 3,5% hingga 5,5% telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu berada pada rentang 3–5% pada setiap variasi kadar aspal. Hal ini menunjukkan bahwa campuran aspal memiliki jumlah rongga udara yang sesuai sehingga campuran tidak terlalu padat maupun terlalu berongga. Nilai VIM yang memenuhi spesifikasi menandakan bahwa campuran masih memiliki ruang yang cukup untuk mengakomodasi

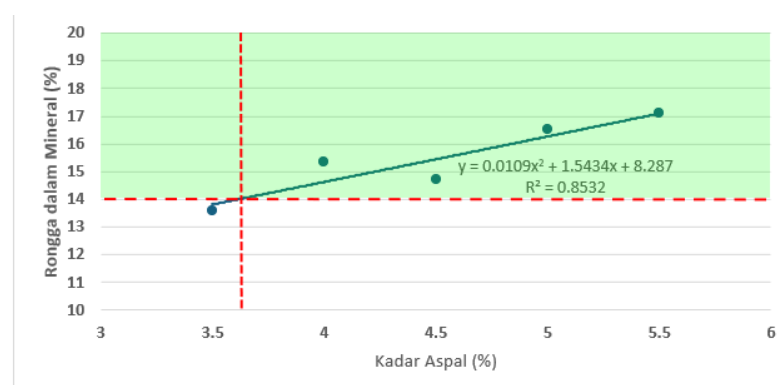
pemuaian aspal akibat perubahan suhu, namun tetap mampu menjaga stabilitas dan ketahanan campuran terhadap deformasi serta masuknya air. Selain itu, seiring bertambahnya kadar aspal, nilai VIM cenderung menurun karena rongga dalam campuran semakin terisi oleh aspal sehingga campuran menjadi lebih rapat dan homogen.

3. Rongga Dalam Mineral (VMA)

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai rongga dalam agregat mineral (*Voids in Mineral Aggregate/VMA*) yang bervariasi. Nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 15 Rekapitulasi Rongga Dalam Mineral

Kadar Aspal (%)	Rongga dalam Mineral	Standar	Keterangan
3,5	13,58	Min. 14%	Tidak memenuhi
4	15,36	Min. 14%	Memenuhi
4,5	14,73	Min. 14%	Memenuhi
5	16,51	Min. 14%	Memenuhi
5,5	17,11	Min. 14%	Memenuhi



Gambar 4. 4 Rongga Dalam Mineral Aspal RAP

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.4, nilai Voids in Mineral Aggregate (VMA) pada kadar aspal 3,5% belum memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, sedangkan pada kadar aspal 4,0% hingga 5,5% seluruhnya telah memenuhi ketentuan minimum sebesar 14%. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan kadar aspal cenderung diikuti oleh kenaikan nilai VMA. Kondisi ini mengindikasikan bertambahnya volume rongga antar butir agregat yang dapat terisi oleh aspal dalam campuran.

VMA merupakan parameter yang menggambarkan jumlah ruang kosong di antara agregat dalam suatu campuran beraspal. Rongga tersebut sebagian akan terisi oleh aspal sehingga berpengaruh terhadap ketahanan campuran terhadap masuknya air dan udara. Semakin besar nilai VMA yang terisi aspal, maka campuran umumnya memiliki tingkat kedap yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan (H. A. Susanto et al., 2024).

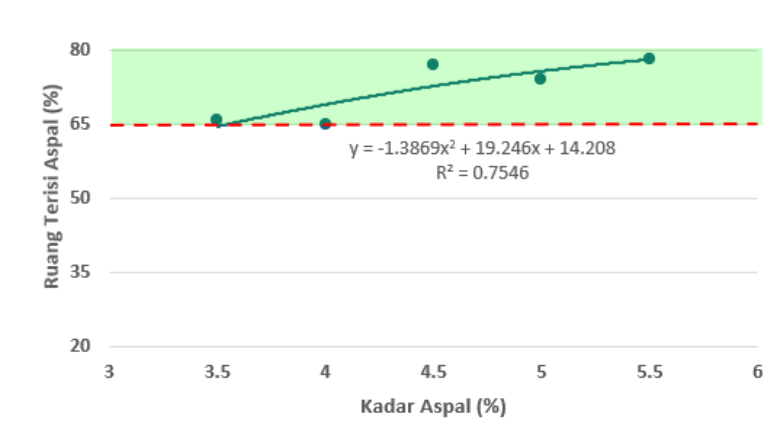
Dengan demikian, kadar aspal 3,5% dinyatakan tidak memenuhi persyaratan karena menghasilkan nilai VMA di bawah batas minimum yang ditetapkan. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh jumlah aspal yang belum mencukupi untuk mengisi rongga antar agregat secara optimal.

4. Rongga Terisi Aspal (VFB)

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai rongga terisi aspal (*Voids Filled with Asphalt/VFA*) yang bervariasi. Nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 16 Rekapitulasi Rongga Terisi Aspal

Kadar Aspal (%)	Rongga Terisi Aspal	Standar	Keterangan
3,5	72,29	Min. 65%	Memenuhi
4	74,73	Min. 65%	Memenuhi
4,5	67,31	Min. 65%	Memenuhi
5	73,33	Min. 65%	Memenuhi
5,5	49,15	Min. 65%	Memenuhi



Gambar 4. 5 Rongga Terisi Aspal RAP

Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.16 dan Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa nilai VFB pada variasi kadar aspal 3,5% sampai 5,5% telah

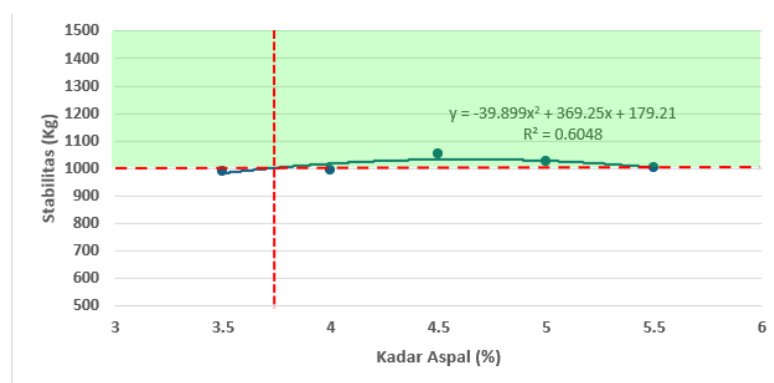
memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu memiliki nilai lebih dari 65%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar rongga di antara agregat telah terisi oleh aspal secara baik sehingga campuran memiliki daya ikat yang cukup kuat. Semakin tinggi kadar aspal yang digunakan, nilai VFB juga cenderung meningkat karena jumlah aspal yang mengisi rongga dalam campuran semakin besar.

5. Stabilitas

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai stabilitas campuran yang berbeda-beda. Nilai stabilitas tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 17 Rekapitulasi Stabilitas *Marshall*

Kadar Aspal (%)	Stabilitas	Standar	Keterangan
3,5	991,30	Min. 1000 Kg	Tidak memenuhi
4	994,03	Min. 1000 Kg	Tidak memenuhi
4,5	1053,50	Min. 1000 Kg	Memenuhi
5	1024,34	Min. 1000 Kg	Memenuhi
5,5	1001,55	Min. 1000 Kg	Memenuhi



Gambar 4. 6 Stabilitas Aspal RAP

Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 4.17 dan Gambar 4.6, nilai stabilitas campuran pada kadar aspal 4,5%, 5,0%, dan 5,5% telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 dengan nilai minimum sebesar 1000 kg untuk campuran yang mengandung RAP. Sementara itu, kadar aspal 3,5% dan 4,0% belum memenuhi persyaratan karena menghasilkan nilai stabilitas di bawah batas yang ditetapkan.

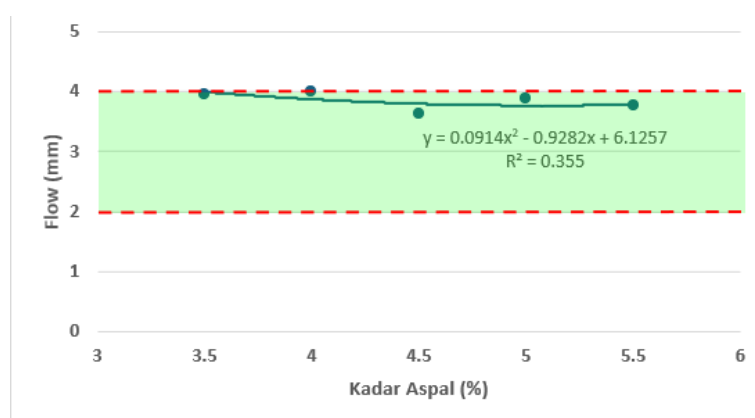
Perbedaan nilai stabilitas tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah proses perendaman benda uji. Semakin lama waktu perendaman, nilai stabilitas campuran cenderung mengalami penurunan akibat berkurangnya daya ikat antara aspal dan agregat karena adanya pengaruh air. Kondisi ini menyebabkan kemampuan campuran dalam menahan beban menjadi lebih rendah (Haris, 2019). Dengan demikian, kadar aspal yang lebih tinggi cenderung memberikan stabilitas yang lebih baik sehingga mampu memenuhi persyaratan spesifikasi yang berlaku.

6. Kelelehan (*Flow*)

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai kelelehan (*flow*) yang bervariasi. Nilai *flow* tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 18 Rekapitulasi *Flow* RAP

Kadar Aspal (%)	Flow	Standar	Keterangan
3,5	3,96	2-4 mm	Memenuhi
4	4,01	2-4 mm	Tidak memenuhi
4,5	3,62	2-4 mm	Memenuhi
5	3,88	2-4 mm	Memenuhi
5,5	3,76	2-4 mm	Memenuhi



Gambar 4. 7 *Flow* Aspal RAP

Berdasarkan grafik pada Tabel 4.18 dan Gambar 4.7 dapat dijelaskan bahwa hanya campuran dengan kadar aspal 4% yang tidak memenuhi persyaratan

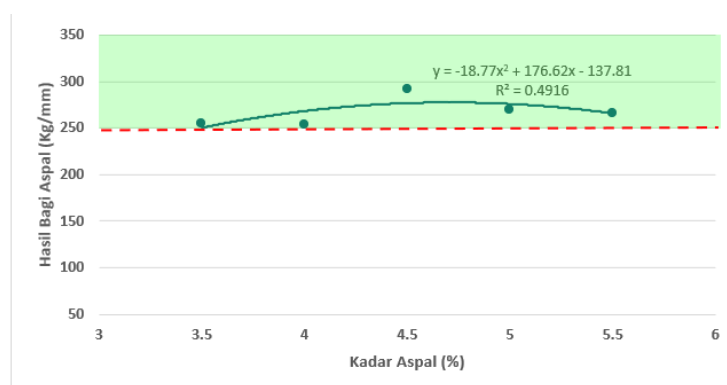
nilai *flow* pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu berada di luar batas nilai *flow* sebesar 2 – 4 mm, sedangkan variasi kadar aspal lainnya masih memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Nilai *flow* dipengaruhi oleh kadar aspal serta tingkat kerapatan campuran, dimana semakin tinggi kadar aspal maka campuran cenderung menjadi lebih lentur dan mudah mengalami deformasi. Selain itu, kepadatan campuran yang kurang optimal juga dapat menyebabkan nilai *flow* meningkat karena ikatan antar agregat menjadi kurang kuat dalam menahan beban.

7. Hasil Bagi Marshall (MQ)

Hasil pengujian *Marshall* pada masing-masing kadar aspal menunjukkan nilai *Marshall Quotient* (MQ) yang bervariasi. Nilai tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 19 Rekapitulasi Hasil Bagi *Marshall* (MQ)

Kadar Aspal (%)	<i>Marshall Quotient</i>	Standar	keterangan
3,5	254,97	Min. 250 kg/mm	Memenuhi
4	254,29	Min. 250 kg/mm	Memenuhi
4,5	291,72	Min. 250 kg/mm	Memenuhi
5	270,29	Min. 250 kg/mm	Memenuhi
5,5	266,19	Min. 250 kg/mm	Memenuhi



Gambar 4. 8 Hasil Bagi *Marshall* Aspal RAP

Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.19 dan Gambar 4.8 diketahui bahwa seluruh variasi kadar aspal mulai dari 3,5% hingga 5,5% menghasilkan nilai MQ yang telah memenuhi ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu minimum sebesar 250 Kg/mm. Nilai MQ yang

diperoleh menunjukkan bahwa campuran memiliki keseimbangan yang baik antara stabilitas dan *flow*, sehingga campuran mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi berlebih. Semakin baik nilai MQ yang dihasilkan maka campuran akan semakin tahan terhadap perubahan bentuk akibat beban lalu lintas.

Setelah dilakukan perhitungan pada masing-masing kadar aspal, maka dapat diketahui rekapitulasi dari perhitungan parameter *Marshall* dan spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 4.20 dan Gambar 4.9.

Tabel 4. 20 Rekapitulasi Perhitungan Parameter *Marshall* Kadar Aspal 3,5% - 5,5%

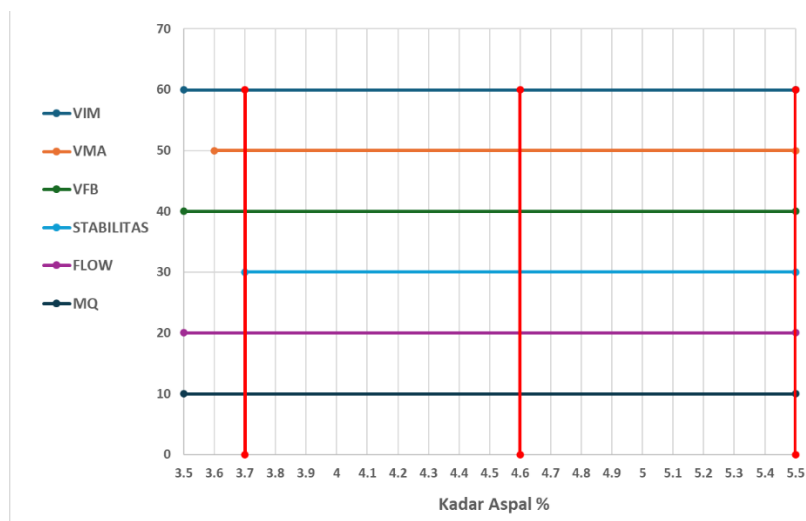
nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
								3 - 5%	Min. 14%	Min. 65%		Min. 1000 kg			2 - 4 mm	Min. 250	
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

Sifat-sifat campuran	Standar uji	LTBA BRAP		ACRAP		
		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 ⁽³⁾	JRA-1980	Min. 2000	Min. 2500			

Gambar 4. 9 Spesifikasi Khusus Interim Bina Marga 2019

4.2.2 Pemilihan Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan RAP

Berdasarkan hasil yang didapatkan melalui perbandingan grafik kadar aspal dengan hasil pengujian *Marshall*, diperorel nilai kadar aspal yang memenuhi karekteristik dan standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 terdapat diantara 3,7% hingga 5,5%.



Gambar 4. 10 Grafik Kadar Optimum Aspal RAP

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.10 maka didapatkan perhitungan KAO sebagai berikut:

$$\text{Pehitungan KAO: } \frac{3,7+5,5}{2} = 4,6\%$$

Berdasarkan nilai KAO sebesar 4,6%, jumlah aspal baru yang ditambahkan pada campuran dengan berat benda uji 1.200gram adalah sebesar 55,2 gram. Penambahan aspal tersebut diperoleh dari perhitungan 4,6% terhadap berat total campuran. Nilai ini menunjukkan bahwa kadar aspal yang digunakan berada pada kondisi optimum, karena mampu memenuhi seluruh parameter *Marshall*, yaitu VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan MQ. Dengan penambahan aspal baru sebesar 55,2 gram, campuran diharapkan memiliki ikatan antaragregat yang baik, rongga udara yang sesuai, stabilitas yang cukup, serta ketahanan yang baik terhadap deformasi dan kerusakan.

4.3 Analisis Hasil Pengujian *Marshall* Aspal dengan Kandungan RAP dan NRL

Pada analisa hasil *Marshall* kali ini, benda uji menggunakan KAO serata *jobmix* yang telah diperoleh dari pengujian sebelumnya. Pengujian dilakukan untuk mengetahui nilai stabilitas serta parameter *Marshall* lainnya pada campuran aspal yang mengandung RAP sebesar 30% dengan variasi penambahan NRL sebesar 0%, 3%, dan 5%. Data hasil perhitungan pengujian *Marshall* dengan kandungan RAP kadar aspal 4,6% dan penambahan NRL 0%, 3%, dan 5% dapat dilihat pada Lampiran F.

4.3.1 Hasil Parameter Aspal dengan Penambahan RAP dan NRL

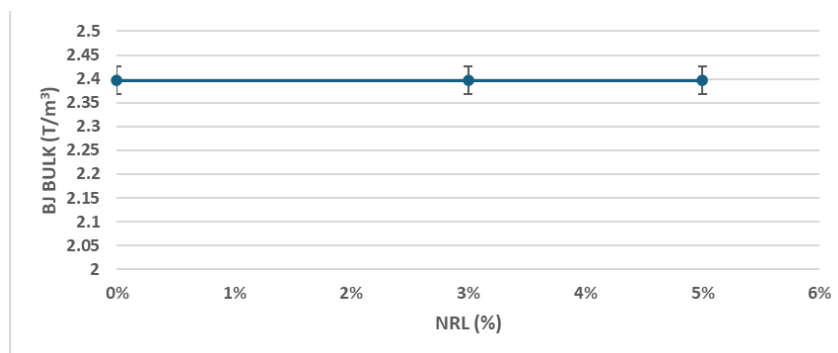
Hasil pengujian *Marshall* yang telah diperoleh kemudian diolah menjadi grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan parameter-parameter *Marshall*. Grafik tersebut digunakan untuk menganalisis perubahan karakteristik campuran akibat variasi kadar aspal serta sebagai dasar dalam menentukan kadar aspal optimum. Uraian hasil analisis masing-masing parameter *Marshall* disajikan pada pembahasan berikut.

1. BJ *Bulk* Campuran

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil BJ *Bulk* Campuran sebagai berikut:

Tabel 4. 21 Rekapitulasi BJ *Bulk* Campuran Aspal dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	BJ <i>Bulk</i> Campuran
4,6	0%	2,302
4,6	3%	2,255
4,6	5%	2,247



Gambar 4.11 BJ *Bulk* Campuran Aspal RAP dan NRL

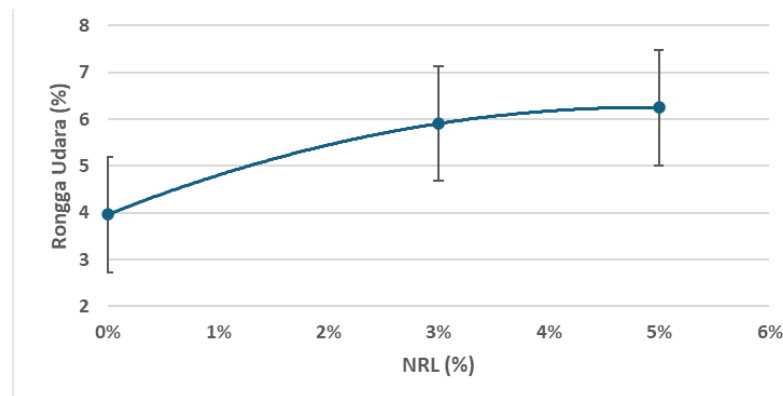
Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.21 dan Gambar 4.11 dapat dijelaskan bahwa campuran aspal yang menggunakan RAP dan NRL dengan variasi kadar NRL sebesar 0%, 3%, dan 5% telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu memiliki nilai berat jenis maksimum kurang dari 2,5 T/m³ pada setiap benda uji. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi 0,030 T/m³. Artinya, setiap nilai rata-rata BJ *Bulk* Campuran memiliki penyimpangan sekitar $\pm 0,030$ T/m³ dari hasil pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa campuran masih memiliki karakteristik kepadatan yang baik serta mampu menghasilkan susunan agregat dan aspal yang cukup homogen. Penambahan RAP dan NRL pada campuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan nilai berat jenis maksimum sehingga campuran tetap berada dalam batas spesifikasi yang disyaratkan.

2. Rongga Udara (VIM)

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil rongga udara sebagai berikut:

Tabel 4.22 Rekapitulasi VIM Aspal RAP dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	Rongga Udara (VIM)
4,6	0%	3,963
4,6	3%	5,905
4,6	5%	6,249



Gambar 4. 12 Rongga Udara Aspal RAP dan NRL

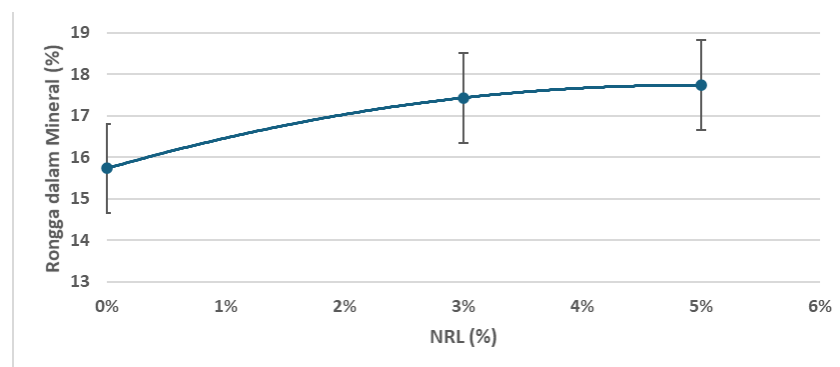
Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.22 dan Gambar 4.11 dapat dijelaskan bahwa campuran aspal dengan penggunaan RAP dan variasi kadar NRL sebesar 0%, 3%, dan 5% telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu memiliki nilai VIM pada rentang 3–5% disetiap variasi kadar NRL. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi 1,232%. Artinya, setiap nilai rata-rata VIM memiliki penyimpangan sekitar $\pm 1,232\%$ dari hasil pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa campuran memiliki jumlah rongga udara yang sesuai, sehingga campuran tidak terlalu padat maupun terlalu berongga. Nilai VIM yang berada dalam batas spesifikasi menunjukkan bahwa penggunaan RAP dan penambahan NRL masih mampu menghasilkan campuran yang stabil serta memiliki kepadatan yang baik. Rongga udara (*Voids in Mix/VIM*) yang berada di luar rentang yang disyaratkan dapat menurunkan kinerja campuran beraspal. Nilai VIM yang terlalu besar memungkinkan masuknya air dan udara ke dalam campuran, sehingga mempercepat proses kerusakan. Sebaliknya, nilai VIM yang terlalu kecil menunjukkan campuran yang terlalu padat dan kaya aspal, yang berpotensi menimbulkan *bleeding* serta deformasi permanen pada permukaan perkerasan saat menerima beban lalu lintas (Sukirman, 2016). Dengan demikian, campuran dengan penggunaan RAP dan penambahan NRL masih layak digunakan karena parameter volumetrik dan karakteristik *Marshall* tetap berada dalam batas yang disyaratkan (Bina Marga, 2025).

3. Rongga Dalam Mineral (VMA)

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil VMA sebagai berikut:

Tabel 4. 23 Rekapitulasi VMA Aspal RAP dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	Rongga dalam Mineral Agregat
4,6	0%	15,732
4,6	3%	17,436
4,6	5%	17,737



Gambar 4. 13 Rongga Dalam Mineral Aspal RAP dan NRL

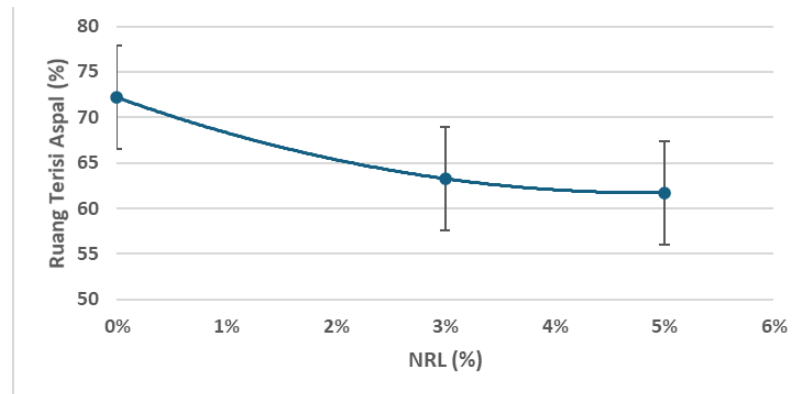
Berdasarkan data pada grafik pada Tabel 4.23 dan Gambar 4.13 dapat menjelaskan bahwa aspal dengan RAP dan NRL dengan kadar 0%, 3%, 5% memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 yaitu dengan nilai minimal 14% pada setiap kadar aspal. Error bar pada grafik menggunakan standar deviasi 1,081%. Artinya, setiap nilai rata-rata VMA memiliki penyimpangan sekitar $\pm 1,081\%$ dari hasil pengujian. Berdasarkan grafik hasil pengujian, nilai VMA menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Peningkatan nilai VMA mengindikasikan semakin besarnya ruang antar agregat yang dapat terisi oleh aspal. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap meningkatnya kekedapan campuran terhadap air dan udara karena semakin banyak rongga yang terisi aspal (H. A. Susanto et al., 2024).

4. Rongga Terisi Aspal (VFB)

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil VFB sebagai berikut:

Tabel 4. 24 Rekapitulasi VFB Aspal RAP dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	Rongga Terisi Aspal
4,6	0%	72,198
4,6	3%	63,261
4,6	5%	61,719

**Gambar 4. 14** Rongga Terisi Aspal RAP dan NRL

Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.24 Gambar 4.14, dapat dijelaskan bahwa campuran aspal dengan RAP dan NRL pada kadar 0% masih memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu dengan nilai VFB minimal 65%, sedangkan pada penambahan NRL 3% dan 5% nilai VFB tidak memenuhi standar. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi 5,657%. Artinya, setiap nilai rata-rata VFB memiliki penyimpangan sekitar $\pm 5,657\%$ dari hasil pengujian. Tidak terpenuhinya nilai VFB tersebut dapat disebabkan oleh nilai VIM yang melebihi batas spesifikasi, sehingga persentase rongga yang terisi aspal menjadi lebih rendah. Selain itu, penambahan NRL sebagai bahan modifikasi berbasis polimer atau karet dapat meningkatkan kekentalan dan sifat elastis *binder*, sehingga campuran menjadi lebih sulit dikerjakan dan membutuhkan suhu serta energi pemadatan yang lebih optimal agar kepadatan rencana dapat tercapai sesuai yang dijelaskan oleh (Putri et al., 2020). Hal ini juga sejalan dengan kajian campuran aspal termodifikasi polimer yang menjelaskan bahwa jenis bahan tambah, temperatur pencampuran, dan temperatur pemadatan dapat memengaruhi *workability* serta *compactibility* campuran aspal (Shen et al., 2023). Dengan demikian, pada kadar NRL 3% dan 5% kemungkinan

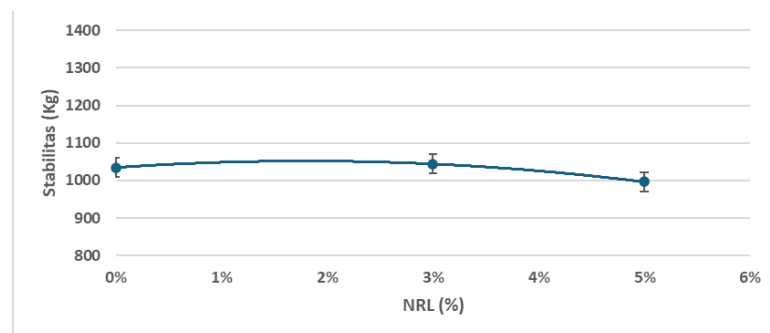
diperlukan proses pemadatan yang lebih optimal atau energi pemadatan yang lebih besar agar rongga udara dalam campuran dapat berkurang dan nilai VFB dapat memenuhi batas spesifikasi.

5. Stabilitas

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil stabilitas sebagai berikut:

Tabel 4. 25 Rekapitulasi Stabilitas Aspal RAP dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	Stabilitas
4,6	0%	1034,44
4,6	3%	1043,96
4,6	5%	996,17



Gambar 4. 15 Stabilitas Aspal RAP dan NRL

Berdasarkan data pada grafik Tabel 4.25 dan Gambar 4.15 dapat menjelaskan bahwa aspal dengan RAP dan NRL dengan kadar 0% dan 3% memenuhi parameter *Marshall* sedangkan untuk kadar NRL 5% tidak memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 yaitu dengan nilai minimal 1000 kg untuk aspal dengan kandungan RAP pada setiap kadar aspal. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi 25,297 kg. Artinya, setiap nilai rata-rata stabilitas memiliki penyimpangan sekitar $\pm 25,297$ kg dari hasil pengujian. Salah satu faktor yang memengaruhi nilai stabilitas campuran adalah durasi perendaman benda uji. Perendaman yang berlangsung dalam waktu lebih lama dapat menyebabkan terjadinya penurunan stabilitas akibat melemahnya ikatan adhesi antara aspal dan agregat karena infiltrasi air ke dalam campuran. Akibatnya, kemampuan

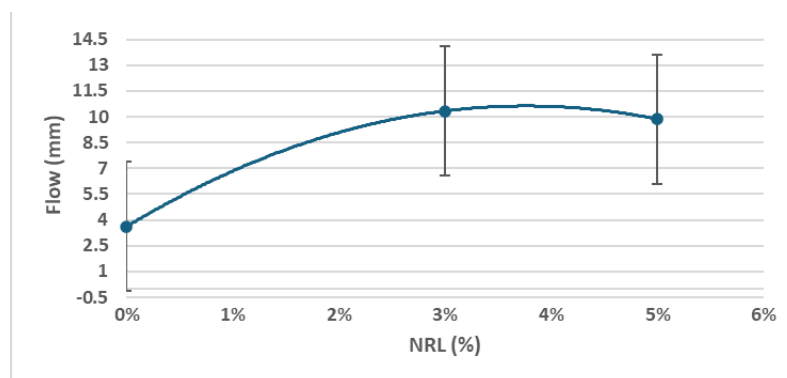
campuran untuk menahan beban berkurang sehingga nilai stabilitas yang diperoleh menjadi lebih rendah (Haris, 2019).

6. Kelelehan (*Flow*)

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil stabilitas sebagai berikut:

Tabel 4. 26 Rekapitulasi Flow Aspal RAP dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	<i>Flow</i>
4,6	0%	3,610
4,6	3%	10,333
4,6	5%	9,867



Gambar 4. 16 *Flow* Aspal RAP dan NRL

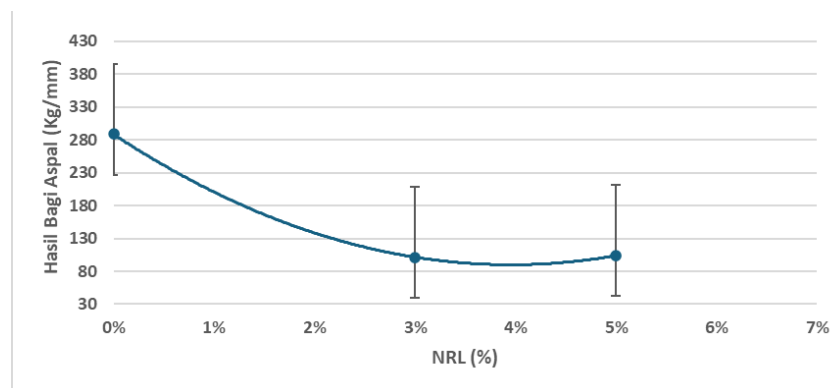
Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.26 dan Gambar 4.16 dapat menjelaskan bahwa aspal dengan RAP dan NRL dengan kadar 0% memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 yaitu dengan nilai 2 – 4mm sedangkan untuk aspal dengan kadar NRL 3% dan 5% tidak memenuhi standar. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi 3,754 mm. Artinya, setiap nilai rata-rata *flow* memiliki penyimpangan sekitar $\pm 3,754$ mm dari hasil pengujian Nilai *flow* dapat dipengaruhi oleh kadar aspal ataupun kerapatan dalam campurannya dan penambahan NRL akan mengakibatkan kelenturan aspal meningkat sehingga membuat nilai *flow* juga meningkat (Mashuri dkk., 2010). Penambahan NRL juga akan mengakibatkan kelenturan aspal mengalami peningkatan dikarenakan sifat *latex*, sehingga membuat nilai *flow* juga dapat meningkat.

7. Hasil Bagi Marshall (MQ)

Berdasarkan pengujian *Marshall* kandungan aspal 4,6% dengan penambahan RAP dan NRL, didapatkan hasil hasil bagi *Marshall* sebagai berikut:

Tabel 4. 27 Rekapitulasi MQ Aspal RAP dan NRL

Kadar Aspal (%)	NRL	<i>Marshall Quotient</i>
4,6	0%	288,66
4,6	3%	101,44
4,6	5%	103,88



Gambar 4. 17 Hasil Bagi *Marshall* Aspal RAP dan NRL

Berdasarkan data dan grafik pada Tabel 4.27 dan Gambar 4.17 dapat menjelaskan bahwa aspal dengan RAP dan NRL dengan kadar 0% memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 yaitu min. 250 Kg/cm² sedangkan aspal dengan penambahan NRL 3% dan 5% tidak memenuhi standar spesifikasi karena penambahan NRL meningkatkan sifat elastis dan kelenturan campuran sehingga nilai *flow* cenderung meningkat, sementara nilai stabilitas mengalami penurunan. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi 107,39 kg/mm. Artinya, setiap nilai rata-rata MQ memiliki penyimpangan sekitar $\pm 107,39$ kg/mm dari hasil pengujian Kondisi tersebut menyebabkan nilai MQ menjadi rendah karena MQ merupakan perbandingan antara stabilitas dan *flow*. Selain itu, campuran yang terlalu lentur mengakibatkan kekakuan campuran berkurang dan lebih mudah mengalami deformasi saat menerima beban, sehingga kemampuan

campuran dalam menahan perubahan bentuk menjadi menurun (Yuniarti dkk., 2018).

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada setiap campuran benda uji, diperoleh rekapitulasi parameter *Marshall* yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik campuran beraspal. Hasil rekapitulasi *Marshall* dan spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 4.28 dan Gambar 4.18.

Tabel 4. 28 Rekapitulasi Hasil *Marshall* Kadar Aspal 4,6 dengan RAP dan NRL

nomor benda uji	kadar aspal	NRL	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	r
									3 - 5%	Min. 14%	Min. 65%		Min. 1000 kg			2 - 4 mm	Min. 250	
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

Sifat-sifat campuran	Standar uji	LTBA BRAP		ACRAP		
		Gradasi halus	Gradasi kasar	WC _{RAP}	BC _{RAP}	Bas _{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 ⁽³⁾	JRA-1980		Min. 2000	Min. 2500		

Gambar 4. 18 Spesifikasi Khusus Interim Bina Marga 2019

8. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* pada campuran AC-WC dengan penggunaan RAP sebesar 30% dan variasi kadar NRL sebesar 0%, 3%, dan 5% pada kadar aspal 4,6%, dapat disimpulkan bahwa penambahan NRL memengaruhi karakteristik volumetrik dan mekanis campuran.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa parameter BJ Bulk Campuran, VIM, dan VMA pada seluruh variasi kadar NRL masih memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Nilai VMA yang meningkat seiring bertambahnya kadar NRL menunjukkan adanya peningkatan ruang antar agregat yang dapat terisi oleh aspal, sehingga berpotensi meningkatkan daya tahan campuran terhadap pengaruh lingkungan.

Pada parameter VFB, hanya campuran dengan kadar NRL 0% yang memenuhi spesifikasi minimum sebesar 65%, sedangkan campuran dengan kadar NRL 3% dan 5% tidak memenuhi persyaratan. Penurunan nilai VFB menunjukkan bahwa persentase rongga agregat yang terisi aspal semakin berkurang akibat meningkatnya rongga udara dalam campuran.

Untuk parameter stabilitas, campuran dengan kadar NRL 0% dan 3% masih memenuhi persyaratan minimum 1000 kg, sedangkan campuran dengan kadar NRL 5% tidak memenuhi spesifikasi. Pada parameter *flow*, hanya campuran dengan kadar NRL 0% yang memenuhi rentang spesifikasi 2–4 mm, sedangkan kadar NRL 3% dan 5% menghasilkan nilai *flow* yang terlalu tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan sifat elastis dan kelenturan campuran sehingga deformasi yang terjadi saat pembebanan menjadi lebih besar.

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) juga mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar NRL. Hanya campuran dengan kadar NRL 0% yang memenuhi persyaratan minimum, sedangkan kadar NRL 3% dan 5% tidak memenuhi spesifikasi akibat meningkatnya nilai *flow* dan menurunnya kekakuan campuran.

Secara keseluruhan, penggunaan RAP sebesar 30% dengan penambahan NRL memberikan pengaruh terhadap karakteristik campuran AC-WC. Variasi NRL 0% menunjukkan kinerja *Marshall* terbaik karena seluruh parameter memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Sementara itu, penambahan NRL sebesar 3% dan 5% meningkatkan fleksibilitas campuran, tetapi menyebabkan beberapa parameter *Marshall*, terutama VFB, *flow*, dan MQ, tidak memenuhi spesifikasi yang disyaratkan. Oleh karena itu, diperlukan optimasi lebih lanjut terhadap kadar NRL maupun proses pencampuran dan pemadatan agar diperoleh campuran yang memenuhi seluruh persyaratan teknis.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan penyesuaian tumbukan, khususnya pada campuran yang menggunakan NRL. Hal ini dikarenakan penambahan NRL meningkatkan sifat elastis dan kelenturan *binder* sehingga campuran cenderung lebih sulit mencapai kepadatan optimum dengan jumlah tumbukan standar. Kondisi tersebut terlihat dari beberapa parameter *Marshall*, seperti VFB yang tidak memenuhi spesifikasi serta nilai Flow yang relatif tinggi pada kadar NRL 3% dan 5%. Oleh karena itu, peningkatan jumlah tumbukan *Marshall* atau optimasi metode pemadatan perlu dilakukan agar benda uji menjadi lebih padat, rongga udara dalam campuran dapat berkurang, dan karakteristik *Marshall* yang dihasilkan dapat memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025.

4.3.2 Analisis Perhitungan Tumbukan Pengujian ITS

Analisis jumlah tumbukan dilakukan untuk memperoleh nilai rongga udara dalam campuran VIM yang sesuai dengan persyaratan serta kebutuhan, yaitu sebesar 5% pada seluruh benda uji campuran aspal yang mengandung RAP dengan variasi kadar NRL sebesar 0%, 3%, dan 5%. Jumlah tumbukan pada proses pemadatan sangat mempengaruhi tingkat kepadatan campuran, dimana semakin besar jumlah tumbukan maka rongga udara dalam campuran akan semakin kecil akibat susunan agregat dan aspal menjadi lebih rapat. Oleh karena itu, diperlukan analisis dan

penyesuaian jumlah tumbukan agar setiap variasi campuran memiliki nilai VIM yang mendekati target sehingga hasil pengujian *Marshall* dapat dibandingkan secara lebih akurat.

Selain itu, penggunaan RAP dan penambahan NRL dapat mempengaruhi karakteristik campuran, terutama terhadap tingkat kekakuan dan kemudahan pemadatan, sehingga penentuan jumlah tumbukan yang tepat menjadi penting untuk menghasilkan campuran yang sesuai spesifikasi. Data perhitungan tumbukan pengujian ITS dapat dilihat pada Lampiran G.

1. Hasil Tumbukan Kadar Aspal 4,6% dengan NRL

Berikut adalah hasil tumbukan kadar aspal 4,6% dengan penambahan NRL variasi 0%, 3%, 5% dapat dilihat pada Tabel 4.29.

Tabel 4. 29 Rekapitulasi Tumbukan Terhadap VIM, Aspal dengan NRL

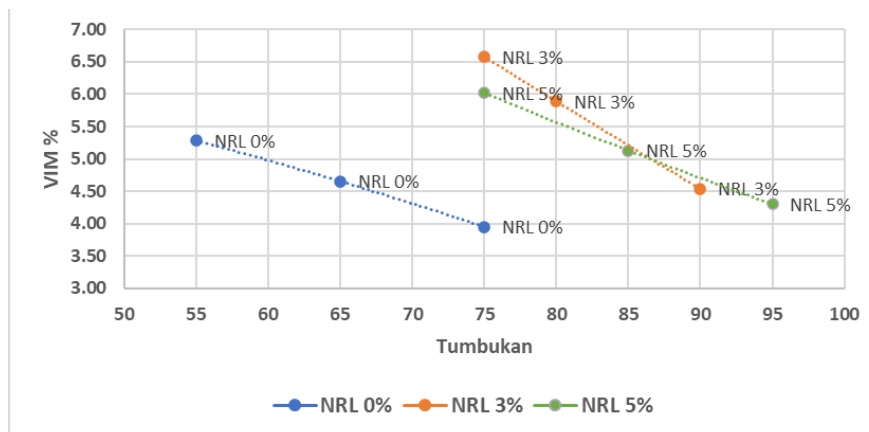
NRL	Tumbukan	VIM (%)	Avg. VIM
0%	55	4,059	5,282
		6,506	
	65	4,138	4,655
		5,172	
	75	4,271	3,948
		3,625	
3%	75	6,576	6,576
		6,576	
	80	5,206	5,891
		6,576	
	90	5,645	4,536
		3,427	
5%	75	6,701	6,022
		5,343	
	85	4,607	5,129
		5,652	
	95	3,936	4,300
		4,664	

Berdasarkan data hasil tumbukan terhadap VIM pada Tabel 4.29, dilakukan analisis hasil tumbukan pada setiap variasi persentase NRL, data yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam grafik hubungan antara jumlah tumbukan dan nilai VIM. Grafik tersebut digunakan untuk

menentukan kebutuhan jumlah tumbukan pada masing-masing persentase NRL agar diperoleh nilai VIM sebesar 5% sesuai dengan target yang direncanakan. Melalui grafik tersebut dapat diketahui pengaruh jumlah tumbukan terhadap tingkat kepadatan campuran, dimana semakin besar jumlah tumbukan maka rongga udara dalam campuran akan semakin berkurang. Dengan demikian, penentuan jumlah tumbukan yang tepat pada setiap variasi NRL diperlukan agar seluruh benda uji memiliki kondisi kepadatan yang relatif sama sehingga hasil pengujian karakteristik *Marshall* dapat dibandingkan secara lebih akurat dan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

2. Hasil Pengujian VIM Kadar Aspal 4,6% dengan NRL

Berikut adalah grafik dan tabel hasil pengujian VIM dengan kadar aspal RAP 4,6% dan penambahan NRL variasi 0%, 3%, 5% dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Tabel 4.30.



Gambar 4. 19 Grafik Rekapitulasi Tumbukan Kadar Aspal RAP dan NRL

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.18 didapat hasil tumbukan pengujian VIM dari kadar aspal 4,6% dan NRL pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 30 Hasil Tumbukan Pengujian VIM untuk ITS

NRL	Jumlah Tumbukan Optimum
0%	60
3%	87
5%	85

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.19 dan Tabel 4.30, diperoleh bahwa campuran aspal dengan kandungan NRL 0% membutuhkan sebanyak 60

tumbukan untuk mencapai nilai VIM sebesar 5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jumlah tumbukan memiliki pengaruh terhadap tingkat kepadatan campuran, dimana pemadatan yang sesuai akan menghasilkan rongga udara dalam campuran sesuai dengan nilai yang direncanakan.

Campuran aspal dengan kandungan NRL 3% membutuhkan sebanyak 87 tumbukan untuk mencapai nilai rongga udara dalam campuran (VIM) sebesar 5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL sebesar 3% mempengaruhi karakteristik campuran terhadap proses pemadatan sehingga jumlah tumbukan yang digunakan harus disesuaikan agar diperoleh nilai VIM yang memenuhi target pengujian.

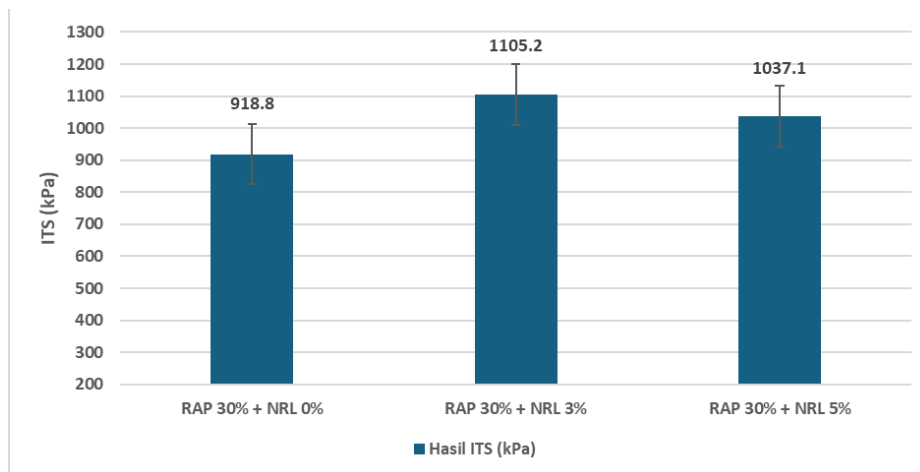
Campuran aspal dengan kandungan NRL 5% membutuhkan sebanyak 85 tumbukan untuk mencapai nilai VIM sebesar 5%. Jumlah tumbukan tersebut menunjukkan bahwa variasi penambahan NRL mempengaruhi tingkat kemudahan campuran dalam proses pemadatan. Dengan pemadatan yang sesuai, rongga udara di dalam campuran dapat dikurangi hingga mencapai nilai yang direncanakan.

4.4 Analisis Hasil Pengujian ITS Aspal dengan RAP dan NRL

Pengujian ITS dilakukan untuk mengetahui kemampuan campuran aspal dalam menahan tegangan tarik tidak langsung. Pada penelitian ini, pengujian ITS dilakukan pada campuran aspal dengan penambahan RAP dan variasi kadar NRL. Hasil pengujian digunakan untuk melihat pengaruh penambahan NRL terhadap nilai kuat tarik tidak langsung campuran aspal yang mengandung RAP. Data hasil uji ITS dapat dilihat pada Lampiran H.

Tabel 4. 31 Rekapitulasi Hasil Pengujian ITS

Benda uji Aspal	Hasil Pengujian ITS (kPa)
Aspal RAP NRL 0%	918,81
Aspal RAP NRL 3%	1105,16
Aspal RAP NRL 5%	1037,14



Gambar 4. 20 Grafik Pengujian ITS Aspal RAP dan NRL

Berdasarkan hasil pengujian kuat tarik tidak langsung yang ditampilkan pada Tabel 4.31 serta Gambar 4.20, campuran AC-WC dengan variasi kadar NRL, diperoleh bahwa nilai ITS rata-rata tertinggi terjadi pada campuran dengan penambahan NRL sebesar 3%, yaitu sebesar 1105,16 kPa. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan campuran tanpa NRL 0% yang memiliki nilai ITS rata-rata sebesar 918,81 kPa maupun campuran dengan penambahan NRL 5% sebesar 1037,14 kPa. *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi sebesar 94,302 kPa. Artinya, setiap nilai rata-rata ITS memiliki penyimpangan sekitar $\pm 94,302$ kPa dari hasil pengujian. *Error bar* ini menunjukkan tingkat variasi atau ketidakpastian data hasil uji ITS pada setiap variasi kadar NRL.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL sebesar 3% mampu meningkatkan kemampuan campuran aspal dalam menahan tegangan tarik tidak langsung. Peningkatan nilai ITS mengindikasikan bahwa ikatan antara agregat dan aspal menjadi lebih baik sehingga campuran lebih tahan terhadap retak akibat beban lalu lintas maupun perubahan suhu (Udomchai et al., 2024).

Sementara itu, pada penambahan NRL sebesar 5% terjadi penurunan nilai ITS dibandingkan campuran dengan NRL 3%, meskipun nilainya masih lebih tinggi dibandingkan campuran tanpa NRL. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan NRL dapat meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan tegangan tarik sampai kadar tertentu, tetapi penggunaan NRL yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu elastis dan mengurangi kestabilan ikatan

antar material. Penelitian mengenai campuran aspal termodifikasi karet atau lateks menunjukkan bahwa bahan tambah berbasis karet dapat meningkatkan kinerja mekanis campuran termasuk nilai ITS, namun diperlukan kadar optimum karena sifat elastis dan perubahan viskositas *binder* dapat memengaruhi *workability*, *compactibility*, serta kekuatan campuran (Utami et al., 2020).

Hal ini juga sejalan dengan penelitian aspal termodifikasi karet alam yang menunjukkan bahwa peningkatan kinerja campuran paling baik terjadi pada kadar optimum, sedangkan kadar yang berlebihan tidak selalu menghasilkan peningkatan kekuatan yang lebih tinggi (Yeanyong et al., 2024). Dengan demikian, kadar NRL 3% dapat dianggap lebih efektif dibandingkan 5% dalam meningkatkan nilai ITS, karena pada kadar 5% campuran mengalami penurunan.

Kesimpulannya adalah hasil pengujian ini menunjukkan bahwa penambahan NRL sebesar 3% menghasilkan nilai ITS tertinggi sebesar 1105,16 kPa, yang mengindikasikan adanya peningkatan ketahanan campuran terhadap tegangan tarik dan potensi retak. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa modifikasi aspal menggunakan bahan berbasis karet mampu memperbaiki ikatan antara agregat dan *binder* sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap kerusakan akibat beban berulang.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Le Trio Ho Minh dan Ohm Byung-Sik (2026) yang mengevaluasi campuran *Warm Mix Asphalt* (WMA) dengan RAP 30% menggunakan kombinasi *Recycled Engine Oil Waste* (REOW) dan *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan bahan modifikasi pada campuran yang mengandung RAP mampu meningkatkan kinerja mekanis campuran, yang ditunjukkan oleh nilai TSR sebesar 83% dan nilai SCB sebesar 1382 J/m². Nilai TSR dan SCB yang tinggi mengindikasikan peningkatan ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembaban serta kemampuan campuran dalam menahan dan memperlambat propagasi retak. Temuan tersebut memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil penelitian ini, dimana penambahan NRL mampu meningkatkan nilai ITS dibandingkan campuran tanpa bahan modifikasi. Perbedaannya ada pada jenis polimer yang digunakan pada penelitian ini dengan penelitian Le Trio Ho Minh dan Ohm Byung-Sik (2026)

Meskipun metode pengujian yang digunakan berbeda, baik ITS pada penelitian ini maupun SCB dan TSR pada penelitian Le Trio Ho Minh dan Ohm Byung-Sik (2026) sama-sama digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran terhadap retak dan kekuatan ikatan internal campuran. Kekurangan dari polimer REOW dan SBS terletak pada harga yang relatif lebih mahal daripada NRL serta pengolahan yang cenderung lebih rumit. Kedua penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan modifikasi berbasis polimer atau karet pada campuran yang mengandung RAP dapat meningkatkan performa mekanis hingga kadar tertentu. Namun, pada penelitian ini ditemukan bahwa peningkatan kadar NRL dari 3% menjadi 5% justru menyebabkan penurunan nilai ITS. Hal tersebut menunjukkan adanya kadar optimum bahan modifikasi, dimana penambahan yang berlebihan dapat meningkatkan sifat elastis campuran secara berlebihan sehingga kekuatan tarik campuran tidak lagi meningkat secara signifikan.

Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung temuan Le Trio Ho Minh dan Ohm Byung-Sik (2026) adalah penggunaan bahan modifikasi pada campuran beraspal yang mengandung RAP dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak dan memperbaiki performa mekanis campuran. Namun, efektivitas peningkatan tersebut sangat dipengaruhi oleh jenis bahan modifikasi dan kadar penggunaannya, sehingga diperlukan penentuan kadar optimum untuk memperoleh kinerja campuran yang maksimal.

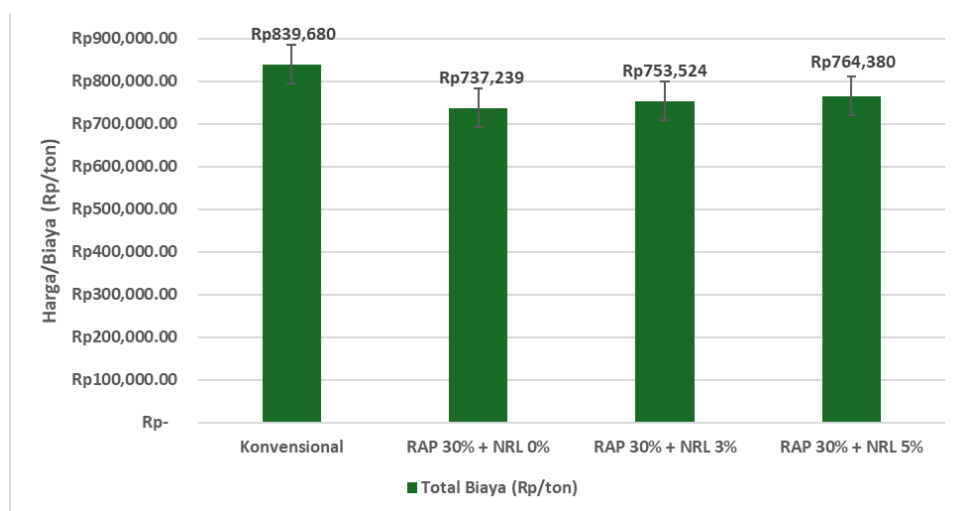
4.5 Analisis Aspal Konvensional dan Modifikasi Terhadap Biaya

Analisis biaya digunakan untuk membandingkan besarnya biaya yang dibutuhkan pada campuran aspal konvensional dengan campuran aspal modifikasi yang memanfaatkan RAP sebesar 30% dan variasi kadar NRL. Hasil analisis ini memberikan gambaran mengenai aspek ekonomis dari penerapan material RAP dan NRL dalam campuran beraspal. Perhitungan biaya didasarkan pada berat bahan sebesar 1200 gram, harga per gram, konversi satuan ke ton, serta hasil akhir harga dalam satuan rupiah per ton. Rekapitulasi dapat dilihat pada Tabel 4.32, bertujuan untuk melihat pengaruh penggunaan RAP dan penambahan NRL terhadap efisiensi

biaya campuran aspal dibandingkan dengan aspal konvensional. Data perhitungan total biaya dapat dilihat pada Lampiran I.

Tabel 4. 32 Rekapitulasi Aspal Konvensional dan Modifikasi Terhadap Biaya

Jenis Aspal	Berat (gr)	Harga (Rp/gr)	Konversi Ton	Harga (Rp/ton)
Aspal Konvensional	1200	Rp 1,007.62	0.833	Rp 839.681
RAP 30% + NRL 0%	1200	Rp 884.688	0.833	Rp 737.240
RAP 30% + NRL 3%	1200	Rp 904.229	0.833	Rp 753.524
RAP 30% + NRL 5%	1200	Rp 917.256	0.833	Rp 764.380



Gambar 4. 21 Grafik Biaya perbandingan Aspal Konvensional dan Modifikasi

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.21, *Error bar* pada grafik menggunakan standar deviasi sebesar Rp45,375. Artinya, setiap nilai biaya memiliki penyimpangan sekitar \pm Rp45,375 dari nilai rata-ratanya. Error bar ini menunjukkan adanya variasi atau ketidakpastian biaya antar campuran. Meskipun terdapat variasi tersebut, penggunaan RAP 30% tetap menunjukkan potensi penghematan biaya, karena nilai biaya campuran RAP 30% dan NRL masih berada dibawah biaya aspal konvensional.

4.5.1 Total Biaya Pembuatan Aspal Konvensional

Berdasarkan Tabel 4.32 dan Gambar 4.21 kebutuhan total biaya material untuk satu benda uji campuran aspal konvensional seberat 1200gram adalah sebesar Rp1.007,62. Nilai tersebut diperoleh dari akumulasi biaya seluruh material penyusun campuran, meliputi agregat kasar, agregat halus, abu batu dan aspal.

Apabila biaya tersebut dikonversikan ke dalam kebutuhan campuran *hotmix* sebesar 1ton (1000 kg), maka diperoleh total biaya sebesar Rp839.680,00. Perhitungan konversi dilakukan dengan membandingkan berat campuran benda uji terhadap berat campuran 1ton.

Total biaya pada pembuatan campuran aspal konvensional dipengaruhi oleh kebutuhan material penyusun campuran, terutama agregat dan aspal sebagai komponen utama dalam campuran *hotmix*. Besarnya kebutuhan material tersebut akan menentukan jumlah biaya yang diperlukan dalam proses pembuatan campuran aspal.

Pada penelitian ini, analisis biaya campuran aspal konvensional dilakukan sebagai pembanding terhadap campuran aspal modifikasi. Perhitungan biaya dilakukan menggunakan metode dan studi kasus yang sama agar hasil analisis dapat dibandingkan secara objektif dan konsisten.

Perhitungan biaya difokuskan pada fase material dengan mengacu pada harga satuan dasar material berdasarkan AHSP Bina Marga dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 dan AHSP Maspetruk area Kota Semarang. Sementara itu, biaya pada fase *manufacturing* dan konstruksi diasumsikan sama karena menggunakan metode produksi, peralatan, serta proses pelaksanaan yang serupa.

4.5.2 Total Biaya Pembuatan Aspal RAP dan NRL

Total biaya pada pembuatan campuran aspal RAP dan NRL sangat dipengaruhi oleh besarnya persentase penggunaan RAP dan NRL dalam campuran. Perubahan kadar RAP dan NRL akan mempengaruhi kebutuhan material baru, terutama agregat dan aspal, sehingga berdampak langsung terhadap biaya material campuran *hotmix*.

Pada penelitian ini, analisis biaya dilakukan dengan membagi campuran ke dalam tiga kelompok variasi, yaitu campuran RAP 30% dengan penambahan NRL sebesar 0%, 3%, dan 5%. Ketiga variasi tersebut dianalisis menggunakan studi kasus dan metode perhitungan yang sama agar hasil perbandingan biaya dapat dilakukan secara objektif dan konsisten.

Perhitungan biaya difokuskan pada fase material dengan mengacu pada harga satuan dasar material berdasarkan AHSP Bina Marga dan Spesifikasi Umum Bina

Marga 2025 dan AHSP Maspetruk area Kota Semarang. Biaya pada fase *manufacturing* dan konstruksi diasumsikan sama pada setiap variasi campuran karena menggunakan metode produksi, peralatan, dan proses pelaksanaan yang serupa.

Penggunaan RAP sebesar 30% bertujuan untuk mengurangi kebutuhan agregat baru dan aspal murni sehingga diharapkan dapat menekan biaya material. Di sisi lain, penambahan NRL sebagai bahan aditif memberikan tambahan biaya pada campuran, namun berpotensi meningkatkan kualitas campuran aspal seperti fleksibilitas, elastisitas, stabilitas, dan ketahanan terhadap retak.

Melalui analisis biaya tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi kadar NRL terhadap efisiensi biaya campuran aspal RAP serta menentukan campuran yang paling optimal ditinjau dari aspek ekonomi dan performa campuran perkerasan jalan. Berikut penjabaran mengenai total biaya aspal dengan RAP dan NRL.

1. Total Biaya Pembuatan Aspal RAP dan NRL 0%

Berdasarkan Tabel 4.32 dan Gambar 4.21 kebutuhan total biaya material untuk satu benda uji campuran aspal dengan NRL 0% seberat 1200gram adalah sebesar Rp884.688,00. Nilai tersebut diperoleh dari akumulasi biaya seluruh material penyusun campuran, meliputi agregat kasar, agregat halus, abu batu, aspal, RAP, dan NRL 0%. Apabila biaya tersebut dikonversikan ke dalam kebutuhan campuran *hotmix* sebesar 1ton (1000 kg), maka diperoleh total biaya sebesar Rp737.240,00. Perhitungan konversi dilakukan dengan membandingkan berat campuran benda uji terhadap berat campuran 1ton.

2. Total Biaya Pembuatan Aspal RAP dan NRL 3%

Berdasarkan Tabel 4.32 dan Gambar 4.21 kebutuhan total biaya material untuk satu benda uji campuran aspal dengan NRL 3% seberat 1200gram adalah sebesar Rp904.229,00. Nilai tersebut diperoleh dari akumulasi biaya seluruh material penyusun campuran, meliputi agregat kasar, agregat halus, abu batu, aspal, RAP, dan NRL 3%. Apabila biaya tersebut dikonversikan ke dalam kebutuhan campuran *hotmix* sebesar 1ton (1000 kg), maka diperoleh total biaya sebesar Rp753.524,00, dimana mengalami kenaikan setelah diberi

penambahan NRL 3%. Perhitungan konversi dilakukan dengan membandingkan berat campuran benda uji terhadap berat campuran 1ton.

3. Total Biaya Pembuatan Aspal RAP dan NRL 5%

Berdasarkan Tabel 4.32 dan Gambar 4.21 kebutuhan total biaya material untuk satu benda uji campuran aspal dengan NRL 5% seberat 1200gram adalah sebesar Rp917.256,00. Nilai tersebut diperoleh dari akumulasi biaya seluruh material penyusun campuran, meliputi agregat kasar, agregat halus, abu batu, aspal, RAP, dan NRL 5%. Apabila biaya tersebut dikonversikan ke dalam kebutuhan campuran *hotmix* sebesar 1ton (1000 kg), maka diperoleh total biaya sebesar Rp764.380,00, dimana mengalami kenaikan selisih dengan penambahan NRL sebesar 3%. Perhitungan konversi dilakukan dengan membandingkan berat campuran benda uji terhadap berat campuran 1ton.

4.6 Analisis Antara Aspal Konvensional dengan Aspal Modifikasi Berdasarkan Biaya dan Parameter *Marshall* serta ITS

Analisis hasil pengujian serta biaya dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan dan efektivitas dari berbagai variabel benda uji aspal. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja masing-masing variasi campuran aspal berdasarkan parameter teknis yang telah ditentukan, seperti stabilitas, *flow*, kepadatan, rongga udara, serta karakteristik lain yang berpengaruh terhadap mutu perkerasan jalan.

Melalui analisis hasil pengujian, dapat diketahui variasi campuran aspal yang memberikan performa paling optimal. Setiap benda uji dianalisis berdasarkan hasil pengujian laboratorium untuk melihat apakah campuran tersebut memenuhi standar atau spesifikasi yang berlaku. Nilai-nilai hasil pengujian kemudian dibandingkan antarvariasi untuk mengetahui pengaruh dari masing-masing variabel terhadap kualitas campuran aspal.

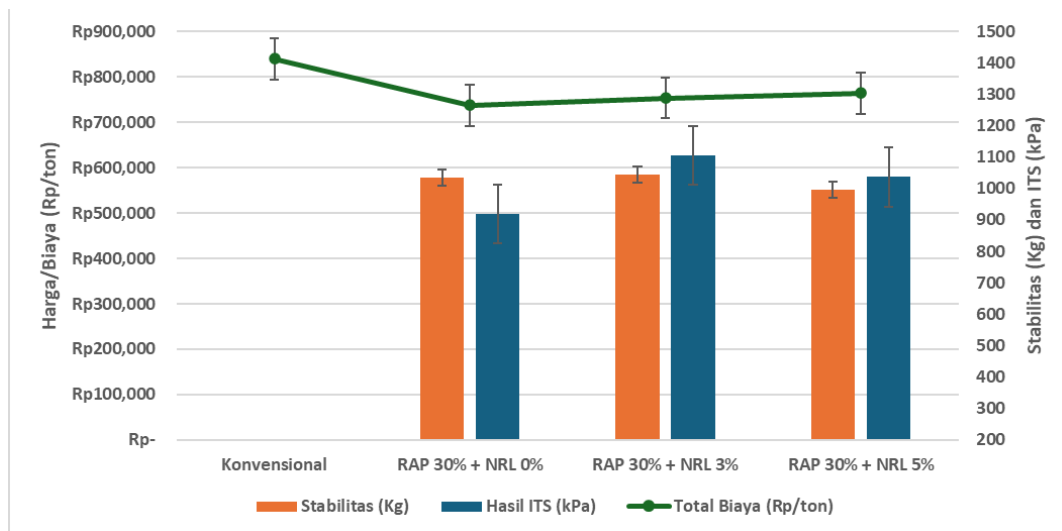
Selain aspek teknis, analisis biaya juga dilakukan untuk mengetahui tingkat efisiensi penggunaan material pada setiap variasi benda uji. Perhitungan biaya mencakup kebutuhan bahan penyusun campuran, seperti agregat, aspal, bahan tambah, serta komponen lain yang digunakan dalam proses pembuatan benda uji.

Dengan demikian, dapat diketahui apakah suatu variasi campuran tidak hanya memiliki kualitas yang baik, tetapi juga ekonomis dari segi biaya produksi.

Hasil dari analisis ini menjadi dasar dalam menentukan variasi campuran aspal yang paling efektif dan efisien. Campuran yang dianggap terbaik adalah campuran yang mampu memenuhi persyaratan teknis, memiliki performa yang stabil, serta membutuhkan biaya yang relatif rendah. Oleh karena itu, analisis hasil pengujian dan biaya sangat penting dilakukan agar pemilihan komposisi campuran aspal dapat memberikan manfaat optimal, baik dari segi kualitas konstruksi maupun efisiensi anggaran. Sebagai dasar perhitungan biaya, harga material yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari beberapa sumber. Harga agregat, aspal, dan material pendukung lainnya mengacu pada data harga material konstruksi yang dipublikasikan oleh Mas Petruk tahun 2025 untuk wilayah Kota Semarang. Sementara itu, harga NRL 60 DRC diperoleh berdasarkan harga produksi yang diberikan oleh PT Kolatex, salah satu produsen NRL yang berlokasi di Kota Bandung. Data harga tersebut kemudian digunakan untuk menghitung kebutuhan biaya pada setiap variasi campuran yang diteliti. Rekapitulasi hasil perhitungan biaya serta hubungan antara biaya campuran dan hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.33 dan Gambar 4.22.

Tabel 4. 33 Rekapitulasi Pengujian dan Biaya

Jenis Aspal	Stabilitas (Kg)	Hasil ITS (kPa)	Total Biaya
Aspal Konvensional	-	-	Rp 839.680,00
RAP30% + NRL 0%	1034,44	918,81	Rp 737.240,00
RAP30% + NRL 3%	1043,96	1105,16	Rp 753.524,00
RAP30% + NRL 5%	996,17	1037,14	Rp 764.380,00



Gambar 4.22 Grafik Rekapitulasi Pengujian dan Biaya

Berdasarkan Tabel 4.33 dan Gambar 4.22 mengenai rekapitulasi hasil pengujian, penilaian stabilitas campuran dengan penggunaan RAP mengacu pada batas minimal stabilitas sebesar 1000 kg sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Acuan ini digunakan untuk menilai kelayakan campuran RAP 30% dengan variasi penambahan NRL sebesar 0%, 3%, dan 5%.

Pada variasi RAP 30% dan NRL 0%, nilai stabilitas berada diatas batas minimal 1000 kg sebesar 1034,44 kg, sehingga campuran ini memenuhi persyaratan stabilitas yang ditetapkan. Selain itu, nilai ITS pada variasi ini mencapai sekitar 918,81 kPa. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP 30% tanpa tambahan NRL sudah mampu menghasilkan campuran yang memiliki ketahanan terhadap beban dan gaya tarik tidak langsung yang cukup baik.

Variasi RAP 30% dan NRL 3% menunjukkan hasil pengujian paling optimal dibandingkan variasi lainnya. Nilai stabilitas pada campuran ini merupakan yang tertinggi, yaitu sekitar 1043,96 kg, dan nilai ITS juga menjadi yang tertinggi, yaitu sekitar 1105,16 kPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan NRL sebesar 3% mampu meningkatkan kinerja campuran, baik dari segi kemampuan menahan beban maupun ketahanan terhadap gaya tarik tidak langsung. Dengan demikian, kadar NRL 3% dapat dianggap sebagai kadar yang paling efektif dalam meningkatkan performa campuran RAP.

Sementara itu, variasi RAP 30% dan NRL 5% tidak memenuhi persyaratan stabilitas karena nilainya berada dibawah batas minimal 1000 kg sebesar 996,17 kg. Nilai ITS pada variasi ini juga masih tergolong tinggi, yaitu sekitar 1034,44 kPa. Namun, nilai stabilitas dan ITS mengalami penurunan dibandingkan variasi NRL 3%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL yang terlalu besar tidak selalu meningkatkan performa campuran. Pada kadar 5%, campuran kemungkinan menjadi terlalu elastis atau kurang optimal dalam membentuk ikatan antar material, sehingga kinerja stabilitas dan ketahanan tarik tidak langsung mengalami penurunan.

Dari segi biaya, seluruh variasi campuran RAP 30% dan NRL 0%, 3%, dan 5% memiliki potensi efisiensi karena memanfaatkan material RAP sebagai bahan daur ulang. Berdasarkan hasil pengujian stabilitas, ITS, dan pertimbangan biaya. Variasi RAP 30% dan NRL 3% dapat disimpulkan sebagai campuran yang paling efektif dan efisien. Campuran ini memenuhi batas stabilitas berdasarkan spesifikasi, memiliki nilai stabilitas dan ITS tertinggi, serta memberikan pemanfaatan RAP yang lebih optimal dalam campuran aspal.