

Pengaruh Bahan Tambah NCR Pada Rancangan Campuran AC-WC Menggunakan Metode Basah

Muksalmina¹, Latif Budi Suparma^{2*}, Suprpto³

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: lbsuparma@ugm.ac.id

INTISARI

Kualitas perkerasan jalan sangat dipengaruhi oleh ketahanan campuran terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan ekstrem. Salah satu inovasi material yang digunakan untuk meningkatkan performa campuran aspal adalah penambahan *nano crumb rubber* (NCR), yang merupakan hasil daur ulang ban bekas dengan ukuran partikel sangat halus. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) yang ditambahkan dengan tiga variasi kadar NCR 0,5%, 0,75%, dan 1% dibandingkan dengan campuran tanpa aditif (0%), menggunakan aspal penetrasi 60/70 dan metode pencampuran basah (*wet process*). Evaluasi dilakukan melalui pengujian karakteristik Marshall untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) masing-masing campuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 0,75% NCR menghasilkan performa campuran terbaik, ditandai dengan stabilitas Marshall yang tinggi, nilai *flow* yang ideal, dan keseimbangan antara densitas serta rongga dalam campuran yang sesuai spesifikasi. Dibandingkan dengan variasi lainnya, campuran 0,75% NCR menunjukkan efisiensi ikatan antar material yang lebih optimal, tanpa menyebabkan kelebihan *flow* atau penurunan kepadatan.

Kata kunci: aspal pen 60/70, *nano crumb rubber*, kadar aspal optimum, *wet process*, Bahan Tambah

1 PENDAHULUAN

Konstruksi jalan beraspal merupakan komponen vital dalam sistem transportasi yang mendukung mobilitas sosial, ekonomi, dan pembangunan wilayah. Dalam konteks negara tropis seperti Indonesia, tantangan terhadap keberlanjutan dan ketahanan jalan kian meningkat seiring dengan tingginya beban lalu lintas, suhu permukaan yang ekstrem, serta paparan kelembaban tinggi (Cetin, 2013). Kondisi ini mempercepat degradasi perkerasan lentur, terutama lapisan permukaan atau *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC), yang sering mengalami deformasi plastis dan retak dini akibat kelelahan material (Hadiwardoyo dkk., 2023). Oleh karena itu, inovasi material melalui modifikasi campuran aspal menjadi kebutuhan yang mendesak untuk meningkatkan daya tahan dan umur layan jalan (Heriadi dkk., 2023).

Salah satu pendekatan yang kini banyak dikaji adalah pemanfaatan *crumb rubber* (CR) dari limbah ban bekas sebagai bahan aditif dalam campuran aspal. Penggunaan CR tidak hanya bertujuan untuk memperbaiki karakteristik teknis aspal, tetapi juga menjadi solusi terhadap akumulasi limbah karet yang berpotensi mencemari lingkungan (Ghafari dkk., 2023). Lebih lanjut, kemajuan teknologi memungkinkan CR diproses hingga ukuran partikel nano, dikenal sebagai *nano crumb rubber* (NCR), yang memiliki distribusi lebih merata dan interaksi kimia yang lebih baik dengan aspal. Ukuran partikel nano meningkatkan luas permukaan kontak dan memfasilitasi pengikatan yang lebih optimal antar elemen campuran, sehingga mampu meningkatkan stabilitas campuran dan memperbaiki performa reologi aspal (Septiawan dkk., 2024).

Aspal penetrasi 60/70 merupakan jenis aspal keras yang banyak digunakan di Indonesia karena kompatibilitasnya dengan iklim tropis. Namun, pada penggunaan jangka panjang, aspal jenis ini tetap rentan terhadap perubahan sifat viskoelastis akibat fluktuasi suhu yang ekstrem (Tarigan dkk., 2022). Oleh sebab itu, modifikasi dengan aditif seperti NCR menjadi solusi potensial untuk mengatasi kekurangan tersebut. Dalam pengaplikasiannya, proses pencampuran NCR ke dalam aspal dapat dilakukan melalui metode basah (*wet process*), yang memungkinkan terjadinya dispersi partikel nano dalam matriks aspal secara lebih menyeluruh dan stabil (Wulandari & Tjandra, 2017).

Evaluasi awal performa campuran aspal termodifikasi dapat dilihat dari hasil perhitungan kadar aspal optimum (KAO), yaitu kadar aspal yang mampu menghasilkan kombinasi terbaik dari seluruh parameter Marshall seperti stabilitas, *flow*, kepadatan, dan rongga udara. KAO merupakan indikator penting dalam desain campuran karena berpengaruh langsung terhadap kekuatan dan keawetan perkerasan (Huang & Wang, 2021). Penelitian ini secara khusus memfokuskan pada perbandingan performa campuran AC-WC dengan variasi kadar NCR sebesar 0%, 0,5%, 0,75%, dan 1%, dengan penentuan KAO dari masing-masing komposisi menggunakan metode Marshall. Tujuannya

adalah untuk mengidentifikasi variasi kadar NCR yang paling efektif dalam meningkatkan karakteristik campuran basah aspal AC-WC dengan aspal penetrasi 60/70.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kadar NCR yang terlalu rendah tidak memberikan pengaruh signifikan, sementara kadar yang terlalu tinggi cenderung menurunkan fleksibilitas dan kepadatan campuran (Heriadi dkk., 2023; Moreno dkk., 2012). Oleh karena itu, identifikasi kadar optimum NCR menjadi sangat penting untuk mencapai keseimbangan performa mekanis dan aspek keberlanjutan. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi empiris terhadap desain campuran aspal modifikasi di Indonesia, tetapi juga memberikan solusi pemanfaatan limbah ban bekas yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam industri infrastruktur jalan.

2 METODE

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk mengevaluasi performa awal campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) melalui penentuan kadar aspal optimum (KAO) pada campuran modifikasi dengan bahan aditif *nano crumb rubber* (NCR). Penelitian ini difokuskan pada analisis karakteristik fisik dan mekanis campuran AC-WC dengan beberapa variasi kadar NCR yang dicampurkan menggunakan metode basah (*wet process*).

Melalui tahapan pengujian Marshall, penelitian ini mengamati perubahan pada parameter-parameter penting seperti stabilitas, *flow*, densitas, VIM (*voids in mix*), VMA (*voids in mineral aggregate*), dan VFA (*voids filled with asphalt*), yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan nilai KAO pada setiap variasi. Empat jenis campuran diuji, yakni campuran tanpa aditif.

2.2 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan utama yang dirancang sesuai dengan kebutuhan campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) termodifikasi. Bahan pengikat yang digunakan adalah aspal jenis penetrasi 60/70. Sementara agregat yang digunakan terdiri dari agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengisi (*filler*), yang seluruhnya memenuhi spesifikasi teknis berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 2 Tahun 2020. Agregat kasar diperoleh dari batu pecah yang lolos saringan 19 mm dan tertahan pada saringan 2,36 mm. Agregat halus diperoleh dari pasir hasil pemecahan batu (abu batu), yang lolos saringan 2,36 mm dan tertahan pada saringan 0,075 mm. Sementara itu, bahan pengisi (*filler*) yang digunakan adalah abu batu.

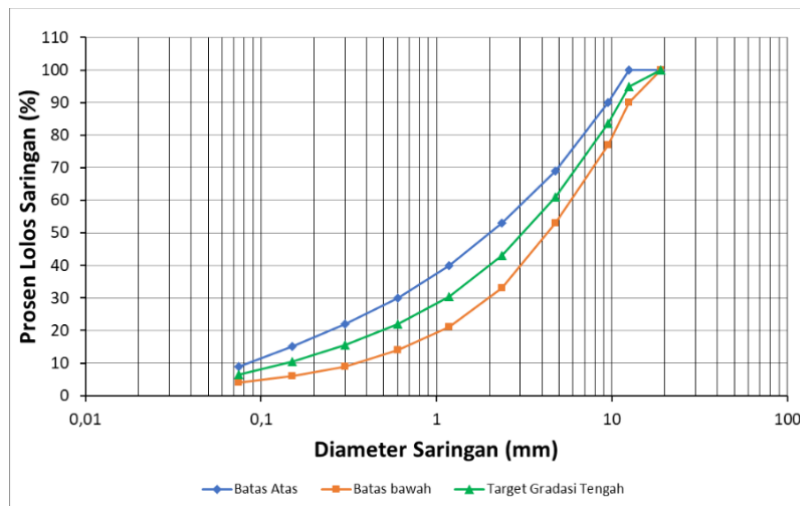
2.3 Gradasi Campuran Agregat Rencana

Campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dalam penelitian ini dirancang berdasarkan empat variasi kadar *nano crumb rubber* (NCR), yaitu 0% sebagai kontrol (tanpa aditif), 0,5%, 0,75%, dan 1% dari total berat campuran. Keempat variasi tersebut dipilih berdasarkan hasil studi terdahulu yang menyatakan bahwa rentang tersebut merupakan batas optimal untuk meningkatkan kinerja campuran aspal tanpa menimbulkan efek negatif terhadap *flow* atau kepadatan (Hadiwardoyo dkk., 2020a; Heriadi dkk., 2023). Gradasi agregat disusun berdasarkan standar AC-WC yang merujuk pada spesifikasi Bina Marga 2020. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Target gradasi agregat campuran AC-WC

Ukuran saringan mm	Spek % Berat Lolos ASTM				Gradasi Agregat
19	3/4	-	-	100	100
13	1/2	90	-	100	95
9,5	3/8	77	-	90	83,5
4,8	No.4	53	-	69	61
2,4	No.8	33	-	53	43

Ukuran saringan mm	ASTM	Spek % Berat Lolos			Gradasi Agregat
1,2	No.16	21	-	40	30,5
0,6	No.30	14	-	30	22
0,3	No.50	9	-	22	15,5
0,2	No.100	6	-	15	10,5
0,1	No.200	4	-	9	6,5
Pan					0



Gambar 1. Target gradasi agregat gabungan AC-WC

2.4 Kadar Aspal Rencana

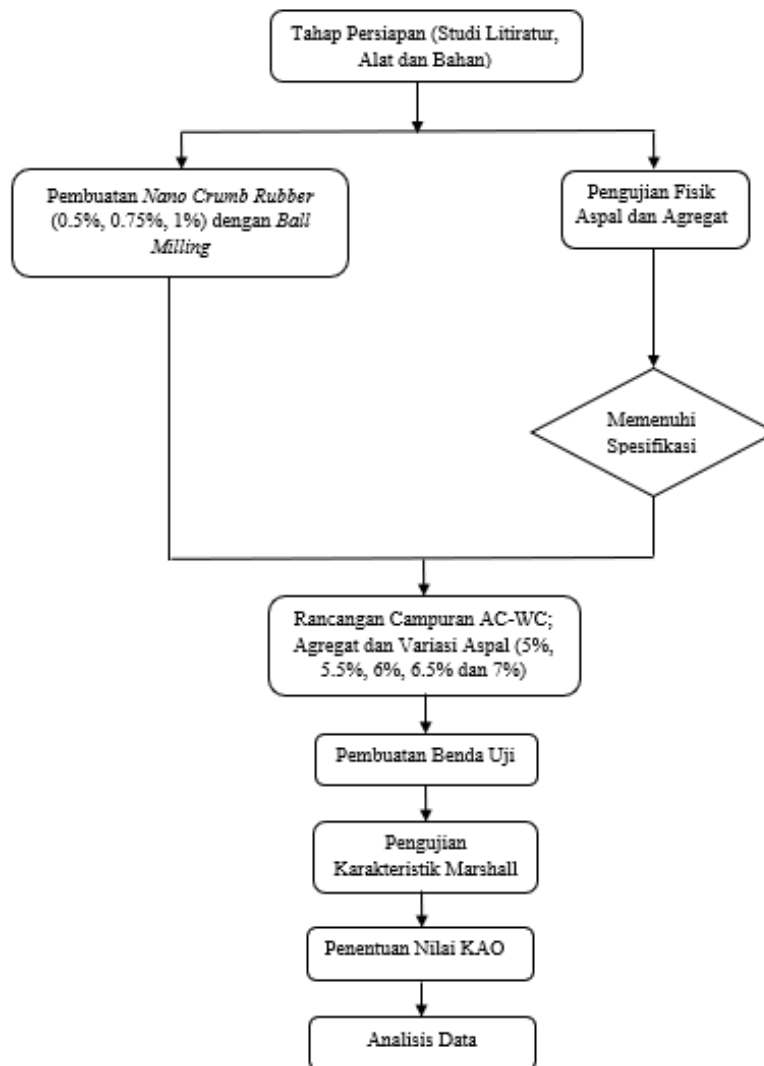
Perkiraan kadar aspal dapat dilakukan setelah menggabungkan tiga fraksi persentase agregat, yaitu agregat kasar, agregat halus, dan agregat pengisi (*filler*). Perkiraan kadar aspal rencana (P_b) sebesar 6,0% jika menggunakan nilai konstanta (k) sebesar 1. Sehingga, dalam penelitian ini menggunakan kadar aspal variasi sebesar 5%, 5,5%, 6%, 6,5% dan 7% untuk mendapatkan kadar aspal optimum (KAO). Kadar aspal rencana secara matematis dapat dicari dengan menggunakan persamaan 3.1.

$$P_b = 0,035. (\%CA) + 0,045. (\%FA) + 0,18. (\%F) + K \quad (1)$$

Dimana P_b adalah kadar aspal rencana, CA adalah persentase agregat kasar dalam campuran, FA adalah persentase agregat halus dalam campuran, F adalah persentase bahan pengisi (*filler*) dalam campuran dan K adalah konstanta (0,5 s/d 1).

2.5 Tahapan Penelitian

Proses penelitian ditampilkan dalam bentuk bagan alir seperti dalam Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Diagram penelitian

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Bahan

Jenis agregat yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sumber lokasi *Quary* batuan di daerah Clereng, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Hasil pengujian ketiga jenis agregat ditunjukkan dalam Tabel 3 sampai Tabel 5.

Tabel 2. Hasil uji agregat kasar

No	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji
1	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan Natrium Sulfat (Soundness Test)	SNI 3407:2008	Maks. 12%	0,492 %
2	Abrasi dengan mesin Los Angeles: a. 100 putaran b. 500 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 8% Maks. 20%	2,786 % 14,149 %
3	Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439:2011	Min. 95%	98,5 %
4	Butir pecah pada agregat	SNI 7619:2021	Min. 95/90	100 / 96,7 %

No	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji
5	Partikel pipih dan lonjong	SNI 8287:2016	Maks. 10%	4,33 %
6	Berat jenis dan penyerapan agregat kasar	SNI 1969:2008	-	2,807 gr/ml

Tabel 3. Hasil uji agregat halus

No.	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji
1	Nilai setara pasir (Sand Equivalent)	SNI 03-4428-1997	Min. 50%	68,33 %
2	Uji kadar rongga tanpa pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45%	46,50 %
3	Gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat	SNI 03-4141-1997	Maks. 1%	0,392 %
4	Agregat lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%	2,96 %
5	Berat jenis dan penyerapan	SNI 1970:2008	-	2,843 gr/ml
6	Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Min. 75%	78,717 %
7	Berat Jenis	SNI 1990:2008	-	2,682 gr/ml

Tabel 4. Hasil uji *filler*

No.	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji
1	Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Min. 75%	78,717 %
2	Berat Jenis	SNI 1990:2008	-	2,682 gr/ml

3.2 Pengujian Penentuan Karakteristik *Marshall*

Sebagai dasar dalam penentuan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO), pengujian dilakukan dengan pendekatan *narrow range* menggunakan metode Marshall. Nilai KAO cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar NCR, baik pada metode pencampuran kering maupun basah. Hal ini disebabkan karena partikel nano memiliki luas permukaan yang besar, sehingga menyerap lebih banyak aspal untuk menghasilkan campuran yang homogen dan stabil. Hasil pengujian benda uji *Marshall* penentuan KAO ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian Marshall penentuan KAO

Kadar NCR (%)	Kadar Aspal (%)	Kepadatan (gr/cc)	VMA (%)	VITM (%)	VFWA (%)	Stabilitas (Kg)	Kelelahan (mm)
		-	>15	3-5	>65	>900	2-4
0	5	2.32	16.09	4.51	71.35	1,536	3.15
	5.5	2.34	15.94	3.15	79.80	1,689	3.59
	6	2.36	15.83	1.81	88.30	1,655	3.34
	6.5	2.37	15.67	0.41	97.32	1,553	3.60
	7	2.37	16.23	- 0.15	100.94	1,515	3.85
0.5 Wet	5	2.34	15.55	4.23	72.77	1,244	2.77
	5.5	2.36	15.09	3.51	83.35	1,598	3.01
	6	2.37	15.15	1.36	91.01	1,425	3.33
	6.5	2.38	15.46	0.50	96.76	1,293	3.64
	7	2.37	16.19	0.14	99.13	1,131	3.95
0.75 Wet	5	2.32	16.34	5.00	68.84	1,485	3.22
	5.5	2.33	16.14	3.64	77.33	1,631	3.43
	6	2.36	15.83	2.09	86.73	1,642	3.61
	6.5	2.37	15.92	0.98	93.82	1,606	3.77
	7	2.37	16.23	0.12	99.26	1,533	3.85
1.0 Wet	5	2.30	17.03	6.11	64.51	1,522	3.60
	5.5	2.32	16.63	4.48	73.37	1,613	3.64
	6	2.34	16.37	3.13	82.00	1,720	3.71
	6.5	2.36	16.21	1.58	90.36	1,529	3.76

Kadar NCR (%)	Kadar Aspal (%)	Kepadatan (gr/cc)	VMA (%)	VITM (%)	VFWA (%)	Stabilitas (Kg)	Kelelehan (mm)
		-	>15	3-5	>65	>900	2-4
	7	2.36	16.44	0.64	96.15	1,261	3.97

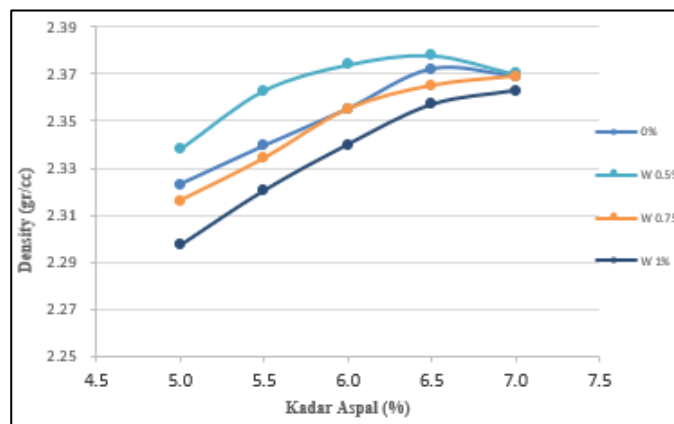
Berdasarkan Tabel 5, hasil pengujian Marshall pada campuran AC-WC dengan variasi kadar *nano crumb rubber* (NCR), diperoleh bahwa penambahan aditif memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik campuran. Untuk campuran tanpa NCR (0%), nilai stabilitas tertinggi sebesar 1.655 kg dicapai pada kadar aspal 6%, dengan kepadatan 2,36 gr/cc dan VITM 1,81%, yang masih sesuai spesifikasi. Sementara itu, pada campuran dengan 0,5% NCR, performa terbaik tercapai pada kadar aspal 6,5% dengan stabilitas 1.693 kg dan VITM 0,50%, menandakan distribusi aspal yang merata dan kinerja struktural yang baik.

Variasi 0,75% NCR menunjukkan hasil paling optimal dibandingkan variasi lainnya. Pada kadar aspal 6,5%, campuran ini memiliki stabilitas tertinggi sebesar 1.733 kg, dengan VITM 0,98%, kepadatan 2,37 gr/cc, dan VFWA 97,82%, yang mencerminkan keseimbangan ideal antara kekuatan dan kelenturan campuran. Sementara itu, variasi 1% NCR juga menunjukkan performa cukup baik, namun nilai kelelehan dan VITM cenderung tinggi, sehingga tidak seefisien variasi 0,75%.

3.3 Analisis Karakteristik Marshall Penentuan KAO

3.3.1 Kepadatan (Density)

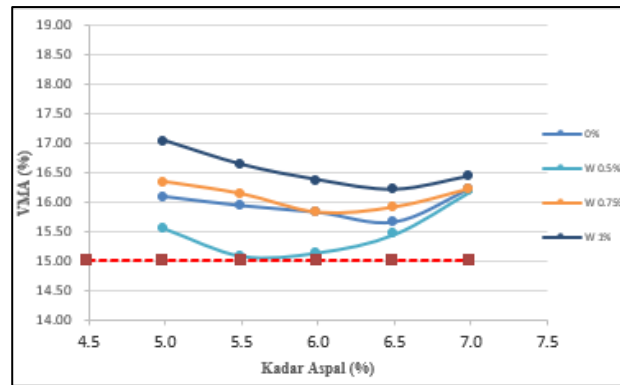
Nilai kepadatan pada seluruh variasi kadar NCR menunjukkan kisaran antara 2,32 gr/cc hingga 2,38 gr/cc. Variasi dengan NCR 0,5% hingga 1,0% menunjukkan pola yang serupa, di mana nilai kepadatan meningkat sampai titik optimum, lalu menurun kembali. Variasi 0,75 wet dengan kadar aspal 6% mencapai nilai tertinggi sebesar 2,38 gr/cc, menandakan bahwa pada komposisi tersebut, campuran mencapai kepadatan maksimum karena hubungan antar partikel paling padat. Grafik *density* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan *density* dengan kadar aspal

3.3.2 Void in Mineral Aggregate (VMA)

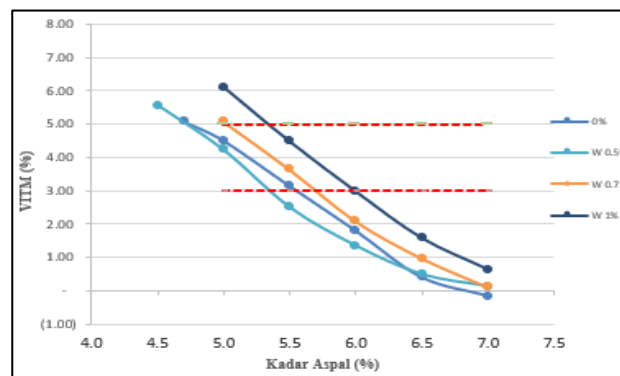
VMA menggambarkan volume rongga antar agregat yang tersedia untuk menampung aspal. Seluruh nilai VMA pada tabel berada dalam batas spesifikasi yaitu >15%, dengan kisaran antara 15,03% hingga 16,44%. Nilai VMA tertinggi sebesar 16,44% diperoleh pada variasi 1% wet dengan kadar aspal 6,5%. Ini menunjukkan bahwa campuran masih menyediakan cukup ruang bagi aspal untuk mengisi rongga tanpa membuat campuran terlalu padat atau kedap. Grafik VMA dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan VMA dengan kadar aspal

3.3.3 Void in Total Mix (VITM)

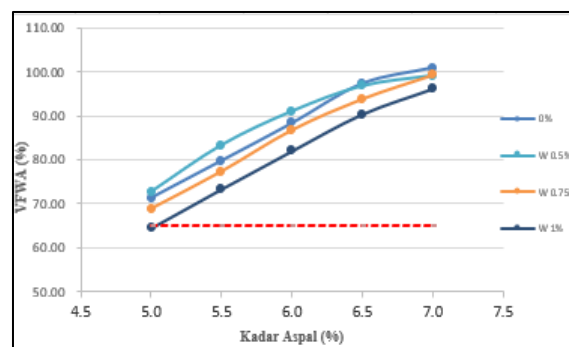
VITM merupakan indikator jumlah rongga udara dalam campuran akhir. Rentang VITM yang disyaratkan adalah 3–5%, namun sebagian besar nilai dalam tabel 6 berada di bawah batas bawah, terutama pada kadar aspal tinggi dan penggunaan NCR. Nilai terendah tercatat pada 0,75 wet kadar aspal 7% yaitu 0,12%, yang menunjukkan bahwa rongga dalam campuran hampir seluruhnya terisi, berisiko terhadap bleeding (kelebihan aspal). Sebaliknya, pada kadar aspal rendah, seperti 5%, nilai VITM masih berada di atas 4%, yang lebih aman dari segi stabilitas terhadap deformasi plastis. Grafik VITM dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan VITM dengan kadar aspal

3.3.4 Void Filled with Asphalt (VFWA)

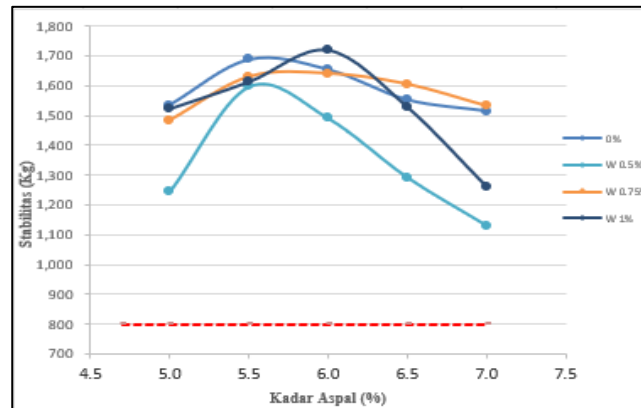
VFWA menunjukkan persentase rongga yang diisi oleh aspal. Nilai VFWA yang disarankan adalah di atas 65%, dan seluruh hasil uji memenuhi kriteria tersebut. Kecenderungan nilai VFWA meningkat tajam pada kadar aspal tinggi dan kadar VITM rendah. Nilai tertinggi terjadi pada variasi 0,5% wet dengan kadar aspal 7%, menunjukkan bahwa hampir seluruh rongga sudah terisi aspal. Grafik VFWA dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan VFWA dengan kadar aspal

3.3.5 Stabilitas *Marshall*

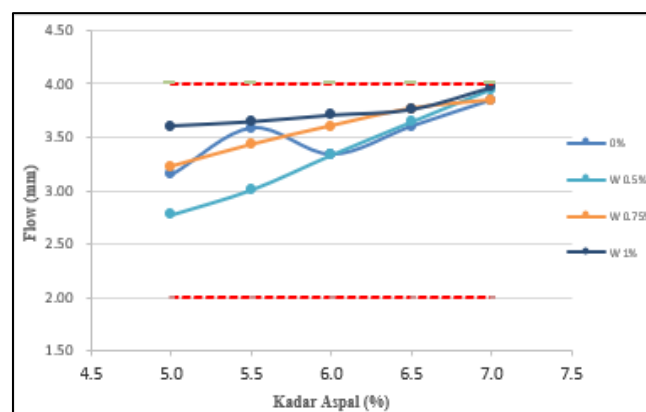
Parameter ini menunjukkan kekuatan struktural campuran terhadap beban. Seluruh campuran menunjukkan nilai stabilitas di atas 900 kg, yang berarti memenuhi syarat minimum yang disyaratkan. Nilai tertinggi tercatat pada 1 wet dengan kadar aspal 6% yaitu 1.720 kg. Ini menunjukkan bahwa kadar NCR sekitar 0,75–1% dengan kadar aspal sedang memberikan kontribusi terbaik terhadap kekuatan campuran. Grafik Stabilitas dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Hubungan Stabilitas dengan kadar aspal

3.3.6 Kelelahan (Flow)

Kelelahan atau *flow* menggambarkan deformasi plastis campuran sebelum mengalami kerusakan. Nilai yang disyaratkan adalah antara 2–4 mm, dan semua variasi masih dalam batas tersebut. Nilai flow tertinggi tercatat sebesar 3,97 mm pada variasi 1% wet kadar aspal 7%, menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih fleksibel pada kadar aspal tinggi. Sementara itu, nilai flow terendah terjadi pada 0,5% wet kadar aspal 5% yaitu 2,27 mm, yang menunjukkan struktur lebih kaku dan tahan deformasi. Grafik kelelahan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan kelelahan dengan kadar aspal

Berdasarkan keseluruhan parameter, dapat disimpulkan bahwa variasi 0,75% NCR pada kadar aspal 6,5% adalah komposisi terbaik, karena menghasilkan nilai KAO dengan karakteristik Marshall yang paling memenuhi standar teknis.

Tabel 6. Nilai KAO menggunakan *Narrow Range*

Kadar NCR (%)	Range Nilai KAO (%)	Kadar Aspal Optimum (%)
0	5 - 5,55	5.3
0.5 Dry	5,3 - 6	5.7
0.75 Dry	5,4 - 6,1	5.8

Kadar NCR (%)	Range Nilai KAO (%)	Kadar Aspal Optimum (%)
1.0 Dry	5,5 - 6,5	6.0
0.5 Wet	5 - 5,35	5.2
0.75 Wet	5 - 5,7	5.4
1.0 Wet	5,35 - 6	5.7

Pada Tabel 6, terlihat bahwa penambahan NCR menunjukkan tren kenaikan nilai KAO seiring dengan meningkatnya kadar NCR. Campuran kontrol (0% NCR) memiliki nilai KAO sebesar $\pm 5,3\%$. Ketika NCR ditambahkan sebesar 0,5%, nilai KAO meningkat menjadi sekitar 5,2% pada *wet process*. Kenaikan ini terus berlanjut hingga kadar 1%, di mana nilai KAO mencapai sekitar 5,7%. Peningkatan nilai KAO tersebut menunjukkan bahwa penambahan NCR cenderung meningkatkan kebutuhan aspal dalam campuran, karena partikel nano memiliki luas permukaan yang tinggi sehingga membutuhkan lebih banyak aspal untuk melapisi permukaan agregat dan NCR secara merata. Hal ini juga sesuai dengan yang disebutkan oleh Hal ini juga mengindikasikan bahwa campuran dengan NCR memiliki karakteristik yang lebih elastis dan kompleks, sehingga memerlukan pengikat yang lebih banyak agar mencapai stabilitas dan kepadatan yang optimal.

No	Kadar NCR	Spesifikasi Umum		Nilai VITM (%)				
		Min	Max	3	3.5	4	4.5	5
1	0	3	5					
2	0,5% Wet	3	5					
3	0,75% Wet	3	5					
4	1% Wet	3	5					
Range Nilai VIM (%)						3,94		
Kadar Aspal Optimum (%)								

Gambar 9. Nilai VITM pada berbagai kadar NCR untuk penentuan KAO

Gambar 9, menunjukkan bahwa seluruh variasi kadar NCR (0%, 0,5%, 0,75%, dan 1% *wet*) menghasilkan nilai VITM yang masih berada dalam rentang spesifikasi umum, yaitu antara 3% hingga 5%. Berdasarkan grafik, diperoleh rentang nilai VITM yang memenuhi kriteria dan menghasilkan nilai tengah sebesar 3,94%, yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO). Dengan demikian, nilai 3,94% merupakan titik tengah dari rentang VITM yang memenuhi spesifikasi dan mencerminkan kadar aspal terbaik dalam menjaga keseimbangan porositas campuran aspal.

3.4 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nano crumb rubber (NCR) ke dalam campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) berpengaruh signifikan terhadap karakteristik Marshall, khususnya dalam meningkatkan stabilitas dan kepadatan campuran. Campuran tanpa aditif (0%) menghasilkan performa yang cukup baik, namun masih dapat ditingkatkan dengan kehadiran NCR. Terbukti, variasi 0,75% NCR pada kadar aspal 6,5% memberikan hasil paling optimal dengan stabilitas mencapai 1.733 kg, VITM sebesar 0,98%, dan kepadatan 2,37 gr/cc. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan aditif dalam jumlah moderat dapat meningkatkan kinerja mekanis campuran tanpa mengganggu keseimbangan volumetrik. Nilai VFWA yang tinggi dan kelelahan yang masih berada dalam batas toleransi juga mengindikasikan distribusi aspal yang merata dan ikatan antar material yang kuat. Penurunan performa mulai terlihat pada variasi 1%, di mana nilai kelelahan dan VITM meningkat, yang menandakan adanya kecenderungan *over-asphalting* dan potensi deformasi plastis lebih tinggi.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Heriadi dkk. (2023), yang menunjukkan bahwa penambahan *crumb rubber* dalam ukuran kecil dapat meningkatkan nilai stabilitas dan kepadatan campuran aspal hingga titik optimum, namun justru menurun jika ditambahkan secara berlebih. Septiawan dkk. (2024) juga menegaskan bahwa penambahan *nano crumb*

rubber dalam kadar tertentu dapat memperbaiki modulus geser dan karakteristik viskoelastis aspal tanpa mengorbankan fleksibilitas. Penelitian oleh Hadiwardoyo dkk. (2020) bahkan mengungkapkan bahwa penggunaan NCR pada rentang 0,75–1,25% adalah yang paling efektif dalam meningkatkan performa campuran terhadap deformasi termal dan kelelahan, yang konsisten dengan temuan dalam penelitian ini. Dengan demikian, hasil penelitian ini menguatkan bahwa NCR dalam dosis terkendali mampu meningkatkan kualitas campuran AC-WC, sekaligus memberikan nilai tambah melalui pemanfaatan limbah ban bekas secara berkelanjutan. Rekomendasi penggunaan 0,75% NCR dalam metode *wet process* dengan kadar aspal 6,5% menjadi formulasi yang tepat untuk diterapkan dalam konstruksi perkerasan jalan di iklim tropis.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian kadar aspal optimum (KAO) terhadap campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) yang dimodifikasi dengan nano crumb rubber (NCR) menggunakan metode basah, dapat disimpulkan bahwa penambahan NCR berpengaruh signifikan terhadap karakteristik Marshall. Penambahan NCR pada kadar tertentu terbukti meningkatkan stabilitas campuran, memperbaiki kepadatan, serta menjaga keseimbangan volumetrik seperti VITM, VMA, dan VFWA. Di antara empat variasi yang diuji (0%, 0,5%, 0,75%, dan 1%), variasi 0,75% NCR pada kadar aspal 6,5% menunjukkan performa terbaik, dengan stabilitas tertinggi sebesar 1.733 kg, kepadatan 2,37 gr/cc, dan nilai *void* yang sesuai spesifikasi teknis.

Hasil ini memperkuat temuan penelitian sebelumnya bahwa penggunaan NCR dalam kadar moderat mampu meningkatkan kualitas campuran aspal tanpa mengorbankan fleksibilitas atau menyebabkan deformasi plastis. Dengan demikian, 0,75% NCR dapat direkomendasikan sebagai kadar aditif yang ideal untuk meningkatkan daya tahan awal campuran AC-WC, khususnya pada wilayah beriklim tropis dengan beban lalu lintas tinggi.

Disarankan agar praktisi teknik jalan dan pembuat kebijakan mempertimbangkan penggunaan *nano crumb rubber* sebesar 0,75% dalam produksi campuran AC-WC sebagai salah satu upaya peningkatan mutu jalan yang ramah lingkungan. Mengingat penelitian ini terbatas pada karakteristik Marshall untuk penentuan KAO, maka sangat disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan terkait kinerja campuran, khususnya dalam kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kelembaban tinggi, dan melalui pengujian lapangan jangka panjang. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas penggunaan NCR pada campuran beraspal lainnya seperti AC-BC atau AC-Base, guna mengevaluasi manfaatnya secara menyeluruh dalam sistem perkerasan lentur.

REFERENSI

- Cetin, A. (2013). Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures. *International Journal of Polymer Science*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/789612>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2) Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan. *Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2018, Revisi 2*, 1–1036.
- Ghafari, S., Ranjbar, S., Ehsani, M., Moghadas Nejad, F., & Paul, P. (2023). Sustainable crumb rubber modified asphalt mixtures based on low-temperature crack propagation characteristics using the response surface methodology. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 123(June 2022), 103718. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103718>
- Hadiwardoyo, S. P., Aryapijati, R. H., Sumabrata, R. J., & Iskandar, D. (2020a). Temperature Effect on the Deformation of the Recycled Hot-Mix Asphalt Concrete with Nano Crumb Rubber as an Added Material with Wheel Tracking Machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 811(1), 12037.
- Hadiwardoyo, S. P., Aryapijati, R. H., Sumabrata, R. J., & Iskandar, D. (2020b). Temperature Effect on the Deformation of the Recycled Hot-Mix Asphalt Concrete with Nano Crumb Rubber as an Added Material with Wheel Tracking Machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 811(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/811/1/012037>
- Hadiwardoyo, S. P., Sumabrata, R. J., Nissa, A. C., Muhammad, F. A., Hia, M., Iskandar, D., & Lumingkewas, R. H. (2023). Improvement of Buton Rock Asphalt Performance by Adding Nano-Crumb Rubber and Waste Engine Oil. In *International Journal of Pavement Research and Technology* (Vol. 16, Issue 5, pp. 1181–1195). <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00189-4>
- Hassan, N. A., Airey, G. D., Jaya, R. P., Mashros, N., & Aziz, M. A. (2014). A review of crumb rubber modification in dry mixed rubberised asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi*, 70(4), 127–134.

<https://doi.org/10.11113/jt.v70.3501>

- Heriadi, Mulyono, A. T., & Suparma, L. B. (2023). Pengaruh Ukuran Butir Karet Ban Bekas Terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran Asphalt Concrete-Binder Course. *HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*, 9(2), 83–92. <https://doi.org/10.26593/jhpji.v9i2.7006.83-92>
- Huang, J., & Wang, Q. A. (2021). Influence of crumb rubber particle sizes on rutting, low temperature cracking, fracture, and bond strength properties of asphalt binder. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 54(2), 1–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01647-4>
- Moreno, F., Rubio, M. C., & Martinez-Echevarria, M. J. (2012). The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage. *Construction and Building Materials*, 26(1), 466–474.
- Septiawan, A., Hadiwardoyo, S. P., Sumabrata, J., & Lumingkewas, R. H. (2024). Contribution of nano crumb-rubber to the rheological characteristics of modified buton rock asphalt. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 20(1).
- Tarigan, N. P., Sembiring, S., & Rumiyan, L. (2022). Karakteristik Struktur, Fungsionalitas dan Sifat Fisis Silika Aspal Dengan Perbandingan 65%: 35%. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 10(2), 151. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v10i2.2621>
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2017). Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture. *Procedia Engineering*, 171, 1384–1389. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.451>