

Perancangan Laboratorium Campuran AC-WC Menggunakan Bahan Tambah *Nano-Crumb Rubber* dengan Metode Kering

Muhammad Nur Hidayat¹, Latif Budi Suparma^{1*}, Suprpto Siswosukarto¹
¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA
*Corresponding author: lbsuparma@ugm.ac.id

INTISARI

Aspal pada perkerasan dalam jangka panjang bisa mengalami pengerasan, maka perlu penambahan aditif supaya tetap lentur. Pada penelitian ini dicoba membuat campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) menggunakan aspal penetrasi 60/70 dengan penambahan lateks, dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik campuran AC-WC pada kadar aspal optimum dengan penambahan variasi lateks 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% terhadap total perekat. *Nano-Crumb Rubber* dicampur terlebih dahulu dengan agregat berdasarkan gradasi ideal, kemudian dicampurkan dengan aspal. Sampel dibuat dengan cara campuran panas. Sampel diuji Marshall. Variasi sampel penelitian ini ialah 0 %, 0,5%, 0,75%, dan 1 % *Nano-Crumb Rubber* dengan jumlah masing-masing 3 benda uji. Diperoleh hasil kadar aspal optimum (KAO) campuran masing-masing sampel yaitu 5,3%, 5,7%, 5,8% dan 6,0 %. Semua karakteristik Marshall dipenuhi. Dipilih campuran AC-WC dengan variasi *Nano-Crumb Rubber* 1% dengan nilai Stabilitas = 1.319 kg (≥ 800 kg), *Flow* = 3,38 mm (2 - 4 mm), Densitas = 2,31 gr/cc, VIM = 3,85 % (3 - 5 %), VMA = 17,96 % (≥ 15 %), VFWA = 86,51 ($\geq 65\%$).

Kata kunci: *Nano Crumb Rubber*, Metode Kering, AC-WC

1 PENDAHULUAN

Peningkatan kualitas perkerasan jalan merupakan aspek krusial dalam mendukung sistem transportasi yang andal, berkelanjutan, dan adaptif terhadap pertumbuhan mobilitas. Dalam sistem perkerasan lentur, lapisan aus (*wearing course*) seperti *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC) memiliki peran vital karena langsung bersentuhan dengan beban lalu lintas dan faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, serta air permukaan. Oleh karena itu, AC-WC dituntut memiliki stabilitas tinggi, ketahanan terhadap deformasi permanen, serta umur layan yang panjang. Seiring meningkatnya kebutuhan performa teknis dan keberlanjutan lingkungan dalam industri jalan, pemanfaatan material daur ulang seperti limbah ban bekas menjadi salah satu pendekatan inovatif yang banyak dikaji. Salah satu bentuk inovasi tersebut adalah penggunaan *Nano-Crumb Rubber* sebagai bahan aditif dalam campuran aspal. Teknologi nano memberikan keuntungan dalam meningkatkan luas permukaan spesifik partikel karet, memungkinkan dispersi yang lebih homogen serta interaksi kimia yang lebih efektif antara karet dan aspal (Liu dkk., 2023). Dengan karakteristik tersebut *Nano-Crumb Rubber* berpotensi meningkatkan berbagai aspek kinerja campuran aspal, termasuk ketahanan terhadap deformasi plastis (*rutting*), kelelahan, dan retak akibat suhu rendah (Liu dkk 2018; Xiang dkk., 2009). Selain material, proses pencampuran juga menjadi faktor penting yang memengaruhi kualitas campuran aspal. Metode pencampuran kering (*dry mix method*) merupakan teknik yang relatif sederhana dan lebih efisien secara operasional dibanding metode basah, karena tidak memerlukan modifikasi aspal di tahap awal. Beberapa studi menunjukkan bahwa metode kering tetap memungkinkan terjadinya interaksi antara karet dan aspal selama proses pencampuran panas, meskipun dengan mekanisme yang berbeda dari metode basah (Saputro dkk., 2022).

Meskipun sejumlah penelitian telah mengkaji efek penggunaan *crumb rubber* terhadap performa mekanis campuran aspal, kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh penggunaan *Nano-Crumb Rubber* terhadap nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dalam campuran AC-WC dengan metode pencampuran kering masih relatif terbatas. Padahal, penentuan KAO merupakan tahap penting dalam desain campuran beraspal karena berpengaruh langsung terhadap kinerja jangka panjang perkerasan, termasuk stabilitas, fleksibilitas, dan daya tahan terhadap beban berulang. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *Nano-Crumb Rubber* terhadap nilai KAO pada campuran AC-WC menggunakan metode pencampuran kering, serta menganalisis karakteristik campuran berdasarkan parameter-parameter Marshall, seperti stabilitas, kelelahan, VIM, VMA, dan VFWA. Penelitian ini didasarkan pada teori perkerasan lentur, prinsip desain campuran aspal metode Marshall, serta literatur terkait penggunaan bahan aditif berbasis karet daur ulang. Hasil penelitian ini diharapkan

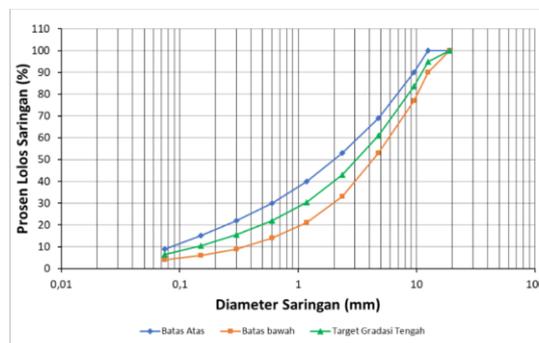
dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam pengembangan material perkerasan jalan yang tidak hanya memenuhi kriteria teknis, tetapi juga lebih ramah lingkungan dan efisien secara ekonomi.

2 METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Aspal
Aspal yang digunakan merupakan jenis aspal shell penetrasi 60/70
- b. Agregat
Agregat yang digunakan berupa agregat kasar dan agregat halus serta *filler* yang diperoleh dari Clereng, Kulon Progo, DI Yogyakarta.
Hasil penetapan gradasi yang didapatkan dari komposisi setiap fraksi agregat dalam campuran disajikan pada Gambar 1.

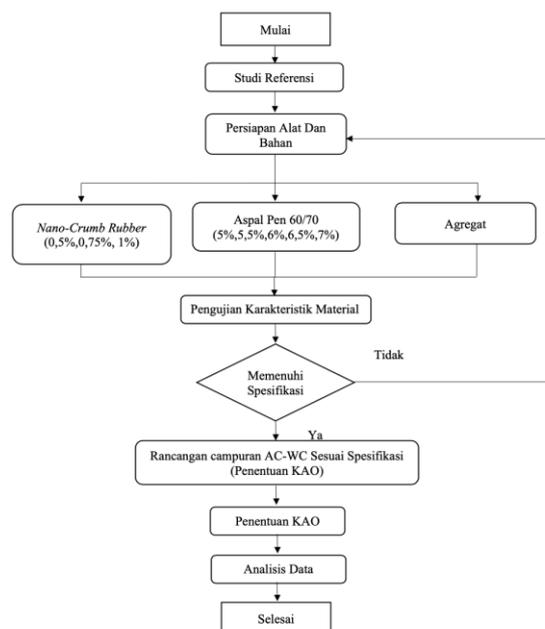


Gambar 1. Gradasi agregat gabungan AC-WC

- c. Bahan Tambah
Bahan tambah berupa *crumb rubber* diperoleh dari PT Graha Jaya Pratama Kinerja.

2.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi referensi untuk mengumpulkan informasi terkait. Selanjutnya adalah persiapan alat dan bahan yang meliputi *Nano-Crumb Rubber* dengan variasi persentase (0,5%, 0,75%, 1%), Aspal Pen 60/70 dengan variasi persentase (5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7%), dan Agregat (Kasar dan halus). Setelah persiapan, dilakukan pengujian karakteristik material untuk memastikan semua bahan memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan. Jika tidak memenuhi spesifikasi, proses akan kembali ke persiapan alat dan bahan. Jika sudah memenuhi, dilanjutkan dengan rancangan campuran AC-WC menggunakan Metode Kering Sesuai Spesifikasi (Penentuan KAO). Tahap berikutnya adalah penentuan KAO (Kadar Aspal Optimum) yang spesifik untuk campuran yang dirancang. Terakhir, dilakukan analisis data dari semua pengujian dan hasil penentuan KAO untuk mendapatkan kesimpulan penelitian

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Karakteristik Bahan

3.1.1 Aspal

Pengujian aspal dilakukan berdasarkan ketentuan Spesifikasi Umum Revisi 2 (2018). Hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 1. menunjukkan bahwa aspal tersebut memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Revisi 2 Bina Marga 2020.

Tabel 1. Hasil uji aspal pen 60/70

No	Pengujian	Metoda	Spesifikasi [*])	Hasil Uji	Keterangan
1	Penetrasi aspal (temperatur 25°C)	SNI 2456:2011	60 – 70 mm	64	Terpenuhi
2	Viskositas kinematis (temperatur 135 °C)	SNI 06-6441-2001	≥ 300 cSt	590	Terpenuhi
3	Titik lembek aspal	SNI 2434:2011	> 48°C	49,5	Terpenuhi
4	Daktalitas (temperatur 25°C)	SNI 2434:2011	> 100 cm	> 100	Terpenuhi
5	Titik nyala aspal	SNI 2434:2011	> 232 °C	332	Terpenuhi
6	Kelarutan dalam larutan Trichloroethylene	AASHTO T44-03	> 99 %	99,80	Terpenuhi
7	Berat jenis kering	SNI 2441:2011	> 1,0	1,039	Terpenuhi
Pengujian Residu Hasil TFOT (SNI 06-2440-1991) atau RTFOT (SNI 03-6835-2002)					
8	Berat yang hilang	SNI 06-2441-1991	< 0,8 %	0,08	Terpenuhi
9	Penetrasi aspal (temperatur 25°C)	SNI 2456:2011	> 54 %	94,31	Terpenuhi
10	Daktalitas (temperatur 25°C)	SNI 2434:2011	> 50 mm	> 100	Terpenuhi

3.1.2 Agregat Halus

Berdasarkan hasil karakterisasi laboratorium, agregat halus tersebut memenuhi seluruh persyaratan teknis yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Revisi 2 (2018). Data hasil pengujian secara rinci disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji agregat halus

No.	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji	Keterangan
1.	Nilai setara pasir (<i>Sand Equivalent</i>)	SNI 03-4428-1997	Maks 50%	68,33 %	Terpenuhi
2.	Uji kadar rongga tanpa pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45%	46,50 %	Terpenuhi
4.	Agregat lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%	2,96 %	Terpenuhi

3.1.3 Agregat Kasar

Prosedur pengujian agregat mengacu pada Spesifikasi Umum Revisi 2 (2018). Seluruh hasil pengujian agregat kasar, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. menunjukkan bahwa material tersebut memenuhi kriteria spesifikasi yang ditetapkan.

Tabel 3. Hasil uji agregat kasar

No.	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji	Keterangan
1.	Kekekalan Bentuk (<i>Soundness Test</i>) (Natrium sulfat/ Magnesium Sulfat)	SNI 3407:2008	Maks 12%	0,492 %	Terpenuhi
2.	Keausan/Abrasi dengan Mesin <i>Los Angeles</i> 100 putaran 500 putaran	SNI 2417:2008	Maks 8% Maks 20%	2,78 % 14,149 %	Terpenuhi Terpenuhi
3.	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	SNI 2439:2011	Min. 95%	98,5 %	Terpenuhi
4.	Butir Pecah pada Agregat Kasar	SNI 7619:2012	95/90%*)	100/96,7 %	Terpenuhi
5.	Partikel Pipih dan Lonjong	SNI 8287:2016 Perbandingan 1:5	Maks. 10%	4,33 %	Terpenuhi
6.	Berat jenis dan penyerapa agregat kasar	SNI 1969:2008	-	2,807 gr/cc	Terpenuhi

3.1.4 Filler

Pengujian terhadap filler difokuskan pada fraksi material yang lolos ayakan No. 200 serta pengukuran berat jenisnya. Rincian hasil karakterisasi filler disajikan secara lengkap pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji filler

No.	Pengujian	Metoda	Spesifikasi	Hasil Uji	Keterangan
1.	Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Min. 75%	78,717 %	Terpenuhi

3.1.5 Bahan Tambah (*Nano-Crumb Rubber*)

Serbuk karet ban bekas (*crumb rubber*/CR) sudah melalui proses pengujian *ball milling* yang menghasilkan ukuran Nano (100 nm) yang tersaji pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji bahan tambah

No.	Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji	Keterangan
1.	Ukuran Butir <i>crumb rubber</i>	Nano (10^{-9})	10^{-9} m	Terpenuhi

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik material, yang meliputi agregat kasar, agregat halus, aspal, bahan tambah *Nano-Crumb Rubber* serta filler, seluruh komponen tersebut memenuhi persyaratan spesifikasi teknis yang berlaku. Dengan demikian, material-material tersebut layak digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini.

3.2 Pengujian Karakteristik Marshall

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik Marshall, yang mencakup parameter mekanik (*mechanical characteristics*) dan volumetrik (*volumetric characteristics*), serta menggunakan pendekatan analisis narrow range. Parameter volumetrik meliputi densitas, *Void Filled with Asphalt*

(VFWA), *Void In The Mix* (VITM), dan *Void in Mineral Aggregate* (VMA), sedangkan karakteristik mekanik mencakup nilai stabilitas Marshall dan Marshall *flow*. Rangkaian hasil pengujian benda uji Marshall untuk penetapan KAO disajikan dalam Tabel 6.

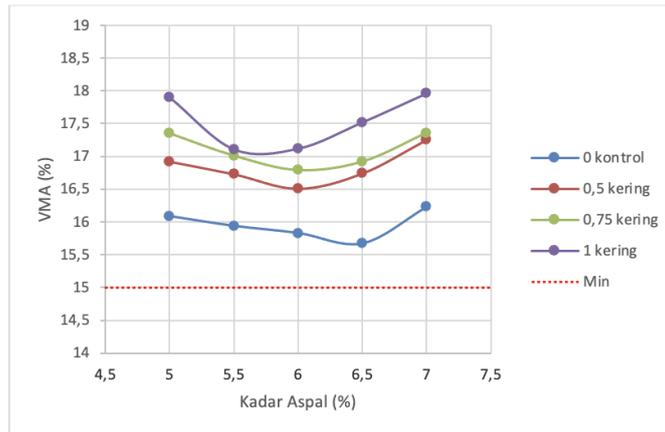
Tabel 6. Hasil Pengujian Marshall Penentuan KAO

Kadar <i>Nano-Crumb Rubber</i> (%)	Kadar aspal (%)	Kepadatan (gr/cc)	VMA (%)	VITM (%)	VFWA (%)	Stabilitas (kg)	Kelelehan (mm)
		-	>15	3-5	>65	>900	2-4
0	5	2,323	16,1	4,5	71,4	1.536	3,2
	5,5	2,339	15,9	3,2	79,8	1.689	3,6
	6	2,355	15,8	1,8	88,3	1.655	3,3
	6,5	2,372	15,7	0,4	97,3	1.553	3,6
	7	2,369	16,2	-0,2	100,9	1.515	3,8
0,5 Dry	5	2,300	16,9	5,8	65,8	1.303	3,5
	5,5	2,317	16,7	4,4	73,7	1.407	3,4
	6	2,336	16,5	3,0	82,2	1.495	3,6
	6,5	2,342	16,7	2,0	88,0	1.427	4,1
	7	2,340	17,3	1,4	91,9	1.324	4,0
0,75 Dry	5	2,288	17,4	6,2	64,0	1.238	3,9
	5,5	2,310	17,0	4,7	72,5	1.404	3,7
	6	2,328	16,8	3,2	80,8	1.423	3,7
	6,5	2,337	16,9	2,2	87,2	1.292	4,3
	7	2,337	17,4	1,5	91,6	1.097	4,4
1 Dry	5	2,273	17,9	7,1	60,8	1.243	3,4
	5,5	2,307	17,1	5,0	70,9	1.309	3,0
	6	2,319	17,1	3,9	77,8	1.319	3,1
	6,5	2,320	17,5	3,1	82,3	1.275	3,4
	7	2,320	18,0	2,5	86,5	1.188	4,3

3.3 Analisis Karakteristik Marshall Penentuan KAO

3.3.1 VMA (*Void in mineral agregat*)

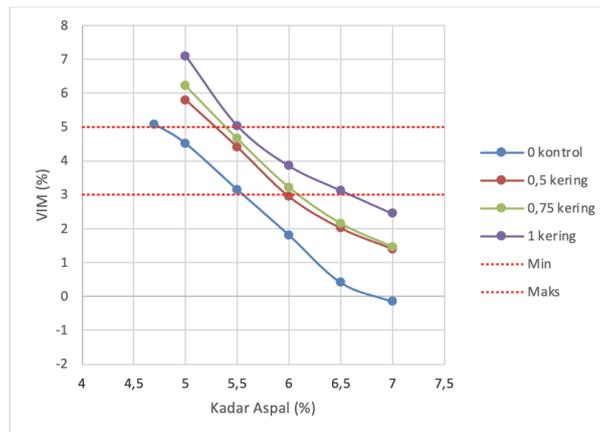
Berdasarkan grafik nilai VMA (*Void in Mineral Aggregate*) (Gambar 3.) pada campuran AC-WC dengan metode kering dan penambahan *Nano-Crumb Rubber*, terlihat bahwa nilai VMA mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar aspal hingga titik tertentu, kemudian naik kembali. Pola ini menunjukkan bahwa rongga antar agregat semakin terisi oleh aspal hingga mencapai kadar optimum, dan setelah itu penambahan aspal yang berlebih menciptakan lapisan film di antara butiran agregat yang justru meningkatkan kembali nilai VMA. Fenomena ini sesuai dengan penjelasan Brown, Kandhal, dan Roberts (1997), yang menyatakan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai VMA umumnya membentuk kurva U. Nilai VMA yang terlalu rendah dapat menyebabkan kekurangan aspal dalam campuran, meningkatkan risiko retak, sedangkan nilai yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan *bleeding* dan menurunkan stabilitas campuran. Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 1, nilai VMA minimum yang disyaratkan untuk campuran AC-WC adalah 15%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi perlakuan, baik kontrol maupun metode kering (0,5; 0,75; dan 1 kering), memenuhi syarat minimum VMA pada seluruh rentang kadar aspal yang diuji. Nilai VMA terendah, yang mencerminkan struktur campuran paling padat, dicapai pada kadar aspal 6,0–6,5%, khususnya pada perlakuan kontrol dan 0,5 kering. Dengan demikian, kadar aspal dalam kisaran tersebut dianggap paling efektif dalam membentuk susunan agregat yang padat dan stabil, serta memenuhi kriteria VMA sesuai standar yang berlaku (Kementerian PUPR, 2018).



Gambar 3. Hubungan antara kadar aspal dengan nilai VMA

3.3.2 VIM (Void in mix)

Berdasarkan grafik nilai VIM (Gambar 4) pada campuran AC-WC dengan metode kering dan penambahan *Nano-Crumb Rubber*, terlihat bahwa nilai VIM cenderung menurun seiring meningkatnya kadar aspal. Hal ini sesuai dengan karakteristik campuran aspal, di mana rongga udara berkurang karena aspal mengisi celah antar agregat. VIM mencerminkan persentase volume udara dalam campuran dan menjadi indikator penting untuk stabilitas serta durabilitas campuran. Menurut Asphalt Institute (2007), nilai VIM yang terlalu tinggi menyebabkan kerentanan terhadap infiltrasi air dan retak, sementara nilai yang terlalu rendah meningkatkan risiko *bleeding*. Brown dkk. (1997) menekankan bahwa VIM optimal diperoleh saat distribusi aspal dan agregat membentuk struktur padat dengan rongga udara yang cukup untuk ekspansi dan drainase. Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 1, nilai VIM yang disyaratkan untuk lapisan AC-WC adalah 3–5%. Pada kadar aspal 5,0–6,0%, sebagian besar variasi masih berada dalam atau mendekati batas tersebut. Namun, pada kadar 6,5% ke atas, beberapa perlakuan menunjukkan nilai di bawah 3%, bahkan negatif, menandakan campuran terlalu padat. Oleh karena itu, kadar aspal optimum dari sisi VIM berada pada kisaran 5,5–6,0%, yang mencerminkan campuran stabil dengan rongga udara yang cukup.

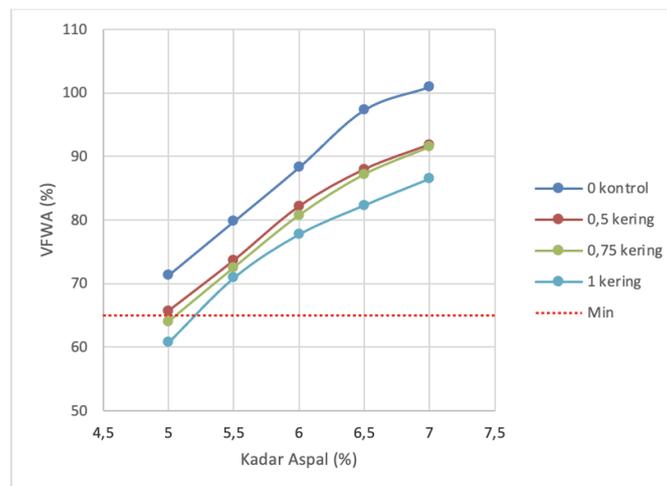


Gambar 4. Hubungan antara kadar aspal dengan nilai VIM

3.3.3 VFWA (Void filled with asphalt)

Berdasarkan grafik nilai VFWA (Gambar 5.) pada campuran AC-WC dengan metode kering dan penambahan *Nano-Crumb Rubber*, diperoleh pola peningkatan nilai VFWA seiring bertambahnya kadar aspal. Tren ini mencerminkan semakin besarnya proporsi rongga dalam agregat mineral (VMA) yang terisi oleh aspal efektif, sebagai konsekuensi logis dari meningkatnya volume aspal yang tersedia untuk mengisi celah antar butiran agregat. Nilai VFWA yang terlalu rendah menunjukkan keterbatasan pelapisan agregat oleh aspal, yang dapat berdampak pada lemahnya daya ikat dan kerentanan terhadap kerusakan akibat pengaruh air atau beban lalu lintas. Sebaliknya, nilai VFWA yang terlalu tinggi mencerminkan keberadaan aspal bebas dalam jumlah berlebih, yang dapat meningkatkan risiko

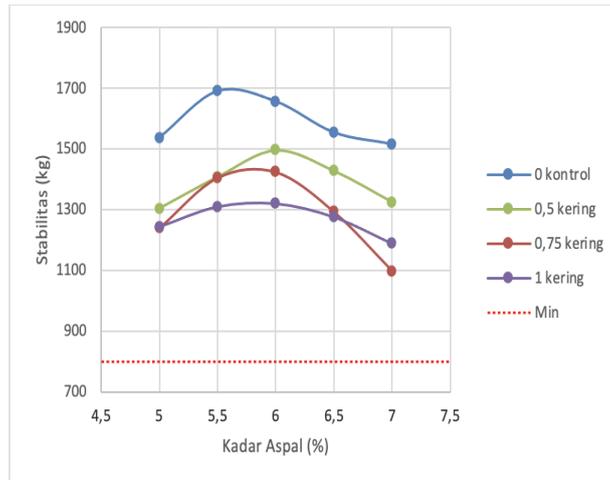
bleeding, terutama pada suhu tinggi (Asphalt Institute, 2007). Dalam konteks campuran aspal modifikasi, penelitian oleh Putman dan Amirhanian (2004) menunjukkan bahwa penggunaan *crumb rubber* cenderung meningkatkan kebutuhan aspal dan berimplikasi pada naiknya nilai VFWA, seiring dengan meningkatnya viskositas aspal. Penelitian lain oleh Shafabakhsh dkk. (2014) menegaskan bahwa nilai VFWA yang berlebihan dalam campuran modifikasi dapat menurunkan kestabilan Marshall akibat terjadinya *bleeding*. Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 1, nilai VFWA minimum yang dipersyaratkan untuk campuran AC-WC adalah sebesar 65%. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh variasi perlakuan (kontrol, 0,5 kering, 0,75 kering, dan 1 kering) telah memenuhi persyaratan tersebut mulai pada kadar aspal 5,0%. Kisaran nilai VFWA optimal berada pada rentang 80%–95%, yang mencerminkan kondisi campuran di mana rongga agregat telah terisi aspal secara efektif tanpa menimbulkan kelebihan aspal bebas. Rentang kadar aspal 5,5% hingga 6,5% menunjukkan nilai VFWA yang paling ideal untuk seluruh variasi perlakuan, khususnya pada perlakuan kontrol dan 0,5 kering. Oleh karena itu, kadar aspal dalam kisaran tersebut dapat dianggap paling efektif dalam membentuk struktur campuran yang padat, stabil, dan memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan.



Gambar 5. Hubungan antara kadar aspal dengan nilai VFWA

3.3.4 Stabilitas (Stability)

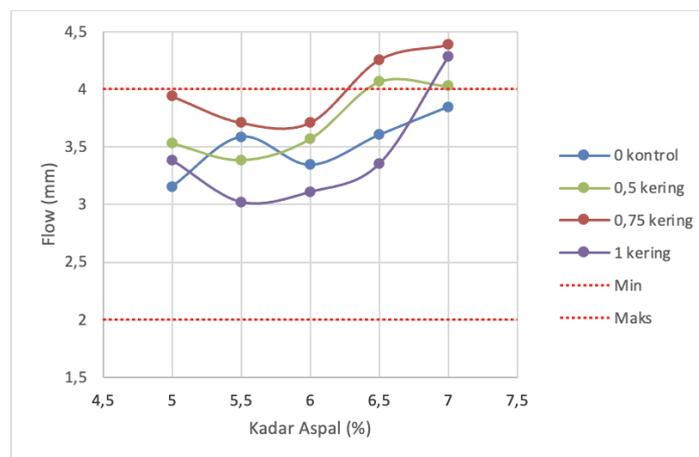
Berdasarkan grafik nilai stabilitas Marshall (Gambar 6.) pada campuran AC-WC dengan metode kering dan penambahan *Nano-Crumb Rubber*, diketahui bahwa nilai stabilitas meningkat seiring bertambahnya kadar aspal hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kadar yang lebih tinggi. Fenomena ini mencerminkan respons karakteristik campuran aspal terhadap penambahan aspal: pada awalnya, aspal berfungsi sebagai perekat yang meningkatkan kohesi antar agregat, sehingga menghasilkan kestabilan struktural yang lebih baik. Namun setelah melewati kadar optimum, kelebihan aspal mulai bertindak sebagai pelumas, mengurangi kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi plastis akibat meningkatnya sifat viskoelastik dari campuran. Secara konseptual, stabilitas Marshall mengukur ketahanan maksimum campuran aspal terhadap beban lalu lintas sebelum terjadi deformasi permanen. Parameter ini dipengaruhi oleh gradasi agregat, kadar aspal, serta tingkat kepadatan campuran. Menurut Asphalt Institute (2007), penambahan aspal dalam jumlah terbatas dapat memperkuat daya ikat antar agregat dan meningkatkan stabilitas, namun setelah melampaui kadar optimum, aspal berlebih dapat menurunkan nilai stabilitas karena struktur campuran menjadi lebih lunak. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 1, nilai minimum stabilitas Marshall untuk campuran AC-WC adalah sebesar 800 kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi perlakuan baik kontrol maupun metode kering dengan kadar *Nano-Crumb Rubber* yang berbeda menampilkan nilai stabilitas yang melebihi ambang batas tersebut pada semua kadar aspal yang diuji. Puncak stabilitas terjadi pada kisaran kadar aspal 5,5% hingga 6,0%, terutama pada perlakuan kontrol dan 0,5 kering, yang menunjukkan bahwa pada rentang tersebut campuran memiliki kekuatan optimal terhadap beban lalu lintas. Dengan demikian, kadar aspal dalam kisaran tersebut dapat dianggap sebagai kadar optimum dari aspek stabilitas Marshall.



Gambar 6. Hubungan antara kadar aspal dengan nilai Stabilitas

3.3.5 Kelelahan (*Flow*)

Berdasarkan Gambar 3.e, grafik nilai *flow* pada campuran AC-WC dengan metode kering dan penambahan *Nano-Crumb Rubber* menunjukkan kecenderungan membentuk pola cekungan, yaitu mengalami penurunan hingga kadar aspal tertentu, kemudian meningkat kembali seiring bertambahnya kadar aspal. Tren ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar aspal awalnya mengurangi deformasi horizontal akibat meningkatnya kohesi antar partikel, namun pada kadar aspal yang lebih tinggi, kelebihan aspal menyebabkan peningkatan plastisitas campuran sehingga nilai *flow* kembali naik. Peningkatan plastisitas tersebut menunjukkan kecenderungan campuran menjadi lebih mudah berubah bentuk saat menerima beban. Secara teoritis, *flow* Marshall merupakan parameter yang mencerminkan kemampuan deformasi campuran aspal akibat beban, dan digunakan untuk menilai tingkat fleksibilitas atau viskoelastisitas dari campuran. *Flow* yang terlalu rendah mengindikasikan campuran bersifat kaku dan berisiko mengalami retak, sedangkan *flow* yang terlalu tinggi menunjukkan campuran cenderung lunak dan rentan terhadap deformasi permanen seperti alur (*rutting*) atau *bleeding* (Roberts dkk., 1996; Asphalt Institute, 2007). Merujuk pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 1, nilai *flow* yang diizinkan untuk campuran AC-WC berada pada kisaran 2,0 mm hingga 4,0 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa hampir seluruh variasi perlakuan memenuhi rentang standar tersebut pada kadar aspal 5,0% hingga 6,5%. Namun pada kadar 7,0%, beberapa perlakuan khususnya pada metode 0,75 kering melampaui ambang batas atas, mengindikasikan bahwa campuran mulai kehilangan stabilitas akibat kelebihan aspal yang meningkatkan deformasi plastis.



Gambar 6. Hubungan antara kadar aspal dengan nilai *flow*

3.3.6 Density

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada grafik, nilai density campuran AC-WC dengan metode kering dan penambahan *Nano-Crumb Rubber* menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal hingga

mencapai titik maksimum pada kadar aspal 6,5%, setelah itu mengalami penurunan. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa penambahan aspal hingga kadar tertentu mampu mengisi rongga antar agregat secara optimal, sehingga meningkatkan kerapatan total campuran. Namun, penambahan aspal di atas kadar optimum menyebabkan terbentuknya aspal bebas yang tidak lagi berkontribusi terhadap pemadatan, bahkan berpotensi menciptakan lapisan lemah dalam struktur campuran, yang berdampak pada penurunan nilai density. Secara teoritis, density merupakan parameter penting dalam mengevaluasi tingkat pemadatan dan efisiensi pengisian rongga oleh aspal dalam campuran beraspal panas. Menurut Roberts dkk. (1996) dan Asphalt Institute (2007), density maksimum biasanya dicapai ketika aspal yang ditambahkan cukup untuk mengisi rongga antar agregat tanpa menimbulkan aspal berlebih yang bersifat plastis dan tidak stabil. Kadar aspal sebesar 6,5% menghasilkan kepadatan maksimum pada campuran, yang menunjukkan struktur campuran paling padat dan efisien sebelum pengaruh negatif dari aspal berlebih mulai terlihat. Titik ini dapat dijadikan sebagai salah satu acuan dalam penetapan kadar aspal optimum dari sisi parameter kerapatan.

Tabel 7. Nilai VIM pada berbagai kadar NCR untuk penentuan KAO

No	Kadar NCR	Spesifikasi Umum		Nilai VIM Kadar Aspal (%)				
		Min	Max	3	3,5	4	4,5	5
1	0	3	5					
2	0,5% Dry	3	5					
3	0,75% Dry	3	5					
4	1% Dry	3	5					
Range Nilai VIM (%)				3,2			4,4	
Kadar Aspal Optimum (%)						3,8		

Berdasarkan Tabel 7, maka hasil penentuan KAO pada masing-masing variasi kadar *Nano-Crumb Rubber* diperoleh seperti tersaji pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil nilai KAO dengan metode *narrow range*

Kadar NCR (%)	Kisaran KAO (%)	Kadar Aspal Optimum (%)
0 Kontrol	5 - 5,55	5,3
0,5 Dry	5,3 - 6	5,7
0,75 Dry	5,4 - 6,1	5,8
1 Dry	5,5 - 6,5	6,0

4 KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa variasi *nano crumb rubber* dalam campuran AC-WC mempengaruhi nilai karakteristiknya. Metode kering menghasilkan KAO lebih tinggi dibandingkan yang variasi kontrol. Karakteristik pencampuran pada metode kering, dimana partikel *Nano-Crumb Rubber* (NCR) dicampurkan langsung ke dalam agregat sebelum ditambahkan aspal. Pada kondisi ini, NCR yang bersifat elastis dan berpori masih memiliki kemampuan menyerap aspal secara aktif, sehingga sebagian aspal terserap ke dalam partikel karet. Proses ini menyebabkan kebutuhan aspal dalam campuran meningkat untuk memastikan seluruh agregat dan bahan tambahan terlapisi sempurna, serta untuk mencapai kinerja campuran yang optimal. Kadar NCR terbaik digunakan sebagai bahan tambah campuran AC-WC adalah berkisar 1 % dengan Kadar Aspal Optimum yaitu 6 %. Penggunaan NCR 1% sebagai bahan tambah meningkatkan VMA 17,96 % dan Nilai VIM 3,13 % dan 5,03 % serta VFWA 86,51%.

REFERENSI

Asphalt Institute. (2007). “*MS-2 asphalt mix design methods* (7th ed.)”. Asphalt Institute.

- Brown, E. R., Kandhal, P. S., & Roberts, F. L. (1997). “*Performance testing for hot mix asphalt* (NCAT Report 97-5)”. National Center for Asphalt Technology.
- Hidayat, M. N., & Ritonga, W. (2022). “Pengaruh campuran abu kulit kakao terhadap karakteristik aspal”. *Einstein*, 10(2), 42.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 1 untuk pekerjaan jalan dan jembatan*. Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Liu, Y., Lu, G., & Wang, H. (2023). “Nano-crumb rubber for enhanced rutting resistance of asphalt pavements: A review”. *Materials Science and Engineering: A*, 864, 144722. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509322010808>
- Liu, Y., Zhu, X., & Zhao, Y. (2018). “Sustainable use of recycled rubber in asphalt pavements”. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3512–3520.
- Mohan, D., Zhang, L., & Chen, J. (2019). “Improvement of asphalt pavement performance using polymers and rubber additives”. *Construction and Building Materials*, 225, 770–779. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.170>
- Mohan, S., Zhang, L., Chen, J., & Li, Y. (2019). “Effect of temperature on skid resistance and rutting resistance of asphalt mixtures”. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(1), 70–79.
- Nian, Y., Wang, X., & Li, H. (2017). “Study on the performance of crumb rubber modified asphalt mixtures”. *Materials Science and Engineering*, 75, 207–216.
- Nian, Z., Zhang, Q., & Yang, X. (2017). “Influence of styrene-butadiene-styrene (SBS) on asphalt rheological properties and performance”. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(45), 45014. <https://doi.org/10.1002/app.45014>
- Putman, B. J., & Amirghanian, S. N. (2004). “Utilization of waste crumb rubber in asphalt binders and mixtures”. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 265–274
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). “*Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction* (2nd ed.)”. National Asphalt Pavement Association Education Foundation.
- Tahan Saputro, D., Budi Suparma, L., & Satyarno, I. (2022). “Pengaruh proses pencampuran kering dan basah terhadap kekesatan AC-WC limbah plastic”. *Jurnal Transportasi*, 22(2), 97–108.
- Xiang, L., Cheng, J., & Que, G. (2009). “Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt”. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3586–3590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.038>