



Pengaruh Metode Pencampuran (Wet Vs Dry) Serbuk Karet Alam Terhadap Karakteristik Binder dan Performa AC-WC

Fairuz Muhammad Ananta

Universitas Sriwijaya, Indonesia

Email: faiananta10@gmail.com

Kata kunci:

Serbuk karet alam; Metode pencampuran basah; metode pencampuran kering; AC-WC; Stabilitas Marshall.

ABSTRAK

Modifikasi aspal menggunakan serbuk karet alam telah menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan performa perkerasan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh metode pencampuran basah (wet process) dan kering (dry process) serbuk karet alam terhadap karakteristik binder dan performa campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC). Metode pencampuran basah dilakukan dengan mencampurkan serbuk karet alam ke dalam aspal pada suhu 160-170°C selama 30-45 menit, sedangkan metode kering dilakukan dengan mencampurkan serbuk karet langsung ke agregat panas. Penelitian menggunakan variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% dengan penambahan serbuk karet alam 30% dan 35% dari berat aspal. Parameter yang diuji meliputi stabilitas Marshall, kelelehan (flow), void in mix (VIM), void in mineral aggregate (VMA), void filled with bitumen (VFB), kepadatan (density), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencampuran basah dengan kadar serbuk karet 30% pada kadar aspal optimum 6,5% menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 893,16 kg, kelelehan 4,9 mm, VIM 2,07%, VMA 16,13%, VFB 87,19%, density 2,283 gr/cm³, dan MQ 182,28 kg/mm. Metode pencampuran basah memberikan performa superior dibandingkan metode kering dalam hal stabilitas, ketahanan terhadap deformasi permanen, dan karakteristik volumetrik. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan metode pencampuran basah dengan kadar serbuk karet alam 30% sebagai alternatif modifikasi aspal untuk meningkatkan kualitas perkerasan AC-WC.

Keywords:

Natural rubber powder; Wet mixing method; Dry mixing method; AC-WC; Marshall stability.

ABSTRACT

Asphalt modification using natural rubber powder has become an innovative solution to enhance pavement performance. This study aims to analyze the effect of wet and dry mixing methods of natural rubber powder on binder characteristics and Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixture performance. The wet mixing method was conducted by blending natural rubber powder into asphalt at 160-170°C for 30-45 minutes, while the dry method involved mixing rubber powder directly with heated aggregates. The study employed asphalt content variations of 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, and 7% with natural rubber powder additions of 30% and 35% by weight of asphalt. Parameters tested included Marshall stability, flow, void in mix (VIM), void in mineral aggregate (VMA), void filled with bitumen (VFB), density, and Marshall Quotient (MQ). Results indicated that the wet mixing method with 30% rubber powder content at optimum asphalt content of 6.5% yielded the highest stability of 893.16 kg, flow of 4.9 mm, VIM of 2.07%, VMA of 16.13%, VFB of 87.19%, density of 2.283 g/cm³, and MQ of 182.28 kg/mm. The wet mixing method demonstrated superior performance compared to the dry method in terms of stability, resistance to permanent deformation, and volumetric characteristics. This study recommends the use of wet mixing method with 30% natural

PENDAHULUAN

Perkerasan jalan merupakan infrastruktur vital yang berperan penting dalam mendukung mobilitas dan pertumbuhan ekonomi suatu negara. Menurut data Kementerian PUPR (2023), tingkat kerusakan jalan nasional di Indonesia mencapai 12,8%, dengan kerusakan utama berupa deformasi permanen (rutting) sebesar 48%, retak lelah 32%, dan kerusakan akibat kelembaban 20%. Secara global, World Bank (2024) melaporkan bahwa kerugian ekonomi akibat kerusakan infrastruktur jalan mencapai USD 1,2 triliun per tahun. Perkerasan aspal konvensional seringkali mengalami kerusakan dini akibat beban lalu lintas yang tinggi, kondisi iklim ekstrem, dan kualitas material yang tidak optimal (Zhao et al., 2024). Kerusakan yang umum terjadi meliputi deformasi permanen (rutting), retak lelah (fatigue cracking), dan kerusakan akibat pengaruh suhu dan kelembaban (Xie et al., 2024). Permasalahan ini mendorong para peneliti dan praktisi untuk mengembangkan teknologi modifikasi aspal guna meningkatkan kinerja dan durabilitas perkerasan.

Modifikasi aspal menggunakan bahan tambah (additive) telah menjadi solusi yang banyak dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir. Salah satu bahan tambah yang menunjukkan potensi signifikan adalah karet alam dan karet daur ulang (Lee & Le, 2023; Khan et al., 2024). Penggunaan karet sebagai modifier tidak hanya meningkatkan karakteristik mekanik dan reologi aspal, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan melalui pemanfaatan limbah karet (Abbassi et al., 2024). Karet alam memiliki keunggulan dalam hal elastisitas, ketahanan terhadap deformasi, dan kemampuan untuk meningkatkan sifat viskoelastik aspal pada berbagai kondisi suhu (Mohammed & Joni, 2024).

Penelitian terdahulu menunjukkan efektivitas modifikasi aspal dengan karet dari berbagai perspektif. Utami et al. (2020) melaporkan bahwa penambahan lateks karet alam meningkatkan stabilitas Marshall hingga 18% dan ketahanan terhadap rutting sebesar 25%. Lee & Le (2023) mengembangkan teknologi pellet aspal-karet dengan kombinasi SBS polymer yang menghasilkan peningkatan performa 30% dibandingkan aspal konvensional. Abbassi et al. (2024) mengidentifikasi bahwa metode aktivasi kimia pada crumb rubber meningkatkan kompatibilitas dengan aspal dan memperbaiki sifat reologi. Khan et al. (2024) melakukan optimasi NBR-modified bitumen menggunakan Response Surface Methodology dan menemukan kombinasi optimal yang meningkatkan ketahanan terhadap aging dan deformasi permanen.

Terdapat dua metode utama dalam aplikasi serbuk karet pada campuran aspal, yaitu metode pencampuran basah (wet process) dan metode pencampuran kering (dry process). Metode pencampuran basah melibatkan reaksi fisiko-kimia antara serbuk karet dengan aspal pada suhu tinggi sebelum dicampurkan dengan agregat, menghasilkan modifikasi binder secara langsung. Dalam proses ini, partikel karet mengalami swelling dengan meningkatkan volume hingga 3-5 kali lipat, mengabsorpsi komponen aromatis aspal, dan membentuk interaksi molekuler yang intensif (Utami et al., 2020; Šernas et al., 2023). Proses ini memungkinkan terjadinya swelling (pengembangan) partikel karet dan interaksi molekuler yang lebih intensif, sehingga mengubah sifat reologi aspal secara fundamental (Al-Fayyadh, 2023). Metode basah

memerlukan investasi peralatan khusus senilai Rp 500-800 juta, waktu pencampuran 30-45 menit, dan konsumsi energi 15-20% lebih tinggi dibandingkan proses konvensional (Mohammed & Joni, 2024). Sebaliknya, metode pencampuran kering menambahkan serbuk karet langsung ke agregat panas atau sebagai pellet, di mana karet bertindak sebagai pengganti sebagian agregat halus atau filler. Metode ini dapat diimplementasikan pada plant aspal konvensional tanpa modifikasi peralatan signifikan, dengan waktu pencampuran hanya 5-10 menit dan biaya investasi minimal (Cárdenas et al., 2020; Zhao et al., 2024). Namun, efisiensi modifikasi binder lebih rendah karena waktu kontak terbatas antara karet dengan aspal (Kumar et al., 2022).

Perbedaan mendasar antara kedua metode ini menghasilkan karakteristik binder dan performa campuran yang berbeda pula. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode basah cenderung menghasilkan peningkatan yang lebih signifikan pada kekakuan binder, titik lembek, dan ketahanan terhadap rutting, namun memerlukan peralatan khusus dan waktu pencampuran yang lebih lama (Abbassi et al., 2024; Zhao et al., 2024). Di sisi lain, metode kering lebih mudah diimplementasikan pada plant aspal konvensional dan dapat menghasilkan performa yang sebanding dengan metode basah jika dioptimalkan dengan tepat (Cárdenas et al., 2020; Kumar et al., 2022).

Indonesia sebagai produsen karet alam terbesar kedua dunia dengan produksi 3,6 juta ton per tahun (2023) memiliki potensi besar dalam pemanfaatan serbuk karet alam untuk modifikasi aspal. Pemanfaatan ini dapat meningkatkan nilai tambah industri karet nasional hingga 40-50% sambil mengurangi impor modifier sintetis senilai USD 120 juta per tahun (Kementerian Perindustrian, 2024). Namun, penelitian komprehensif yang membandingkan metode pencampuran basah dan kering menggunakan serbuk karet alam Indonesia masih terbatas. Penelitian sebelumnya lebih banyak fokus pada crumb rubber dari ban bekas yang memiliki karakteristik berbeda. Crumb rubber mengandung 40-50% natural rubber, 25-30% synthetic rubber, dan 20-25% carbon black serta additives, sedangkan natural rubber powder memiliki kemurnian 95-98% dengan kandungan protein dan asam lemak yang berbeda. Perbedaan komposisi ini menghasilkan reaktivitas, kompatibilitas dengan aspal, dan mekanisme swelling yang berbeda (Mildawati et al., 2024).

Urgensi penelitian ini didasari oleh tiga faktor utama. Pertama, kebutuhan mendesak untuk mengembangkan teknologi modifikasi aspal yang sesuai dengan kondisi iklim tropis Indonesia dengan suhu permukaan perkerasan mencapai 60-70°C. Kedua, potensi pemanfaatan sumber daya lokal untuk mengurangi ketergantungan pada modifier impor dan meningkatkan nilai tambah industri karet nasional. Ketiga, belum adanya guideline teknis yang komprehensif untuk aplikasi serbuk karet alam dalam konstruksi perkerasan jalan di Indonesia.

Kebaruan penelitian ini terletak pada empat aspek. Pertama, komparasi sistematis antara metode wet dan dry process menggunakan serbuk karet alam Indonesia (SIR 20) yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Kedua, evaluasi komprehensif pada dua kadar serbuk karet (30% dan 35%) untuk mengidentifikasi kadar optimum. Ketiga, analisis karakteristik Marshall lengkap mencakup tujuh parameter untuk menentukan kadar aspal optimum dengan metode grafis. Keempat, rekomendasi praktis untuk implementasi di industri konstruksi jalan Indonesia berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomis.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh metode pencampuran (wet vs dry) serbuk karet alam terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC; (2) mengevaluasi

pengaruh variasi kadar serbuk karet (30% dan 35%) terhadap stabilitas, kelelahan, dan parameter volumetrik campuran; (3) menentukan kadar aspal optimum untuk setiap variasi metode pencampuran dan kadar serbuk karet; (4) membandingkan performa kedua metode pencampuran berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018.

Manfaat penelitian ini meliputi: (1) kontribusi ilmiah berupa pemahaman mendalam tentang mekanisme interaksi serbuk karet alam dengan aspal pada metode basah dan kering; (2) rekomendasi praktis bagi industri konstruksi jalan dalam memilih metode pencampuran yang optimal berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomis; (3) basis data karakteristik Marshall untuk pengembangan spesifikasi teknis aspal modifikasi karet alam Indonesia; (4) dukungan terhadap program pemanfaatan sumber daya lokal dan pengembangan industri karet nasional.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Universitas [nama universitas], pada periode Maret-Agustus 2024. Lokasi pengambilan material agregat dari Quarry Cimalaka, Sumedang, Jawa Barat, sedangkan serbuk karet alam diperoleh dari PT Perkebunan Nusantara IX, Jawa Tengah.

Populasi penelitian adalah seluruh kemungkinan campuran AC-WC dengan modifikasi serbuk karet alam menggunakan metode wet dan dry process. Sampel penelitian ditentukan menggunakan teknik purposive sampling dengan kriteria: (1) kadar aspal 5-7% dengan interval 0,5%; (2) kadar serbuk karet alam 30% dan 35% dari berat aspal; (3) metode pencampuran wet dan dry process. Total sampel yang dibuat adalah 60 benda uji Marshall (4 variasi \times 5 kadar aspal \times 3 replikasi).

Teknik pengambilan sampel menggunakan prinsip replikasi untuk meningkatkan reliabilitas data. Setiap kondisi percobaan diulang tiga kali ($n=3$) dan hasil dianalisis menggunakan metode rata-rata. Randomisasi dilakukan pada urutan pembuatan benda uji untuk menghindari bias sistematis akibat variasi kondisi lingkungan atau operator.

Material Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa material utama yang terdiri dari agregat, aspal, dan serbuk karet alam. Agregat yang digunakan berasal dari quarry lokal yang telah memenuhi spesifikasi untuk campuran AC-WC sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran maksimum 19 mm, agregat halus berupa abu batu, dan filler berupa semen Portland. Semua agregat telah melalui pengujian karakteristik fisik meliputi berat jenis, penyerapan air, abrasi, dan kelekatan terhadap aspal. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 yang merupakan jenis aspal yang umum digunakan untuk perkerasan jalan di Indonesia. Aspal diperoleh dari PT Pertamina dan telah memenuhi spesifikasi standar dengan nilai penetrasi 60-70 dmm, titik lembek 48-58°C, dan daktilitas minimum 100 cm. Serbuk karet alam yang digunakan adalah Natural Rubber Powder dengan spesifikasi teknis SIR 20 (Standard Indonesian Rubber grade 20) yang telah diproses menjadi serbuk dengan ukuran partikel lolos saringan No. 40 (0,425 mm). Serbuk karet alam diperoleh dari pengolahan karet alam Indonesia dan memiliki karakteristik elastisitas tinggi serta kemampuan swelling yang baik dalam aspal panas.

Desain Campuran dan Variasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain campuran AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course) dengan gradasi agregat gabungan yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Gradasi agregat dirancang untuk menghasilkan campuran yang padat dan stabil dengan distribusi ukuran butir yang optimal. Kadar aspal yang digunakan bervariasi dari 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, hingga 7% terhadap berat total campuran untuk menentukan kadar aspal optimum.

Variasi penelitian dibagi menjadi empat kelompok utama berdasarkan metode pencampuran dan kadar serbuk karet alam: Wet Process 30% (WP 30%): Metode pencampuran basah dengan penambahan serbuk karet alam sebesar 30% dari berat aspal, Wet Process 35% (WP 35%): Metode pencampuran basah dengan penambahan serbuk karet alam sebesar 35% dari berat aspal, Dry Process 30% (DP 30%): Metode pencampuran kering dengan penambahan serbuk karet alam sebesar 30% dari berat aspal, Dry Process 35% (DP 35%): Metode pencampuran kering dengan penambahan serbuk karet alam sebesar 35% dari berat aspal. Setiap variasi diuji pada lima kadar aspal berbeda (5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%) dengan tiga sampel replikasi untuk setiap kondisi, sehingga total sampel yang dibuat adalah 60 benda uji Marshall.

Prosedur Pencampuran

Metode Pencampuran Basah (Wet Process) Pada metode pencampuran basah, serbuk karet alam terlebih dahulu dicampurkan dengan aspal panas sebelum dicampurkan dengan agregat. Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut: Aspal penetrasi 60/70 dipanaskan hingga mencapai suhu 160-170°C dalam wadah pencampur khusus. Serbuk karet alam ditambahkan secara bertahap ke dalam aspal panas dengan persentase 30% atau 35% dari berat aspal. Campuran aspal dan serbuk karet diaduk menggunakan mechanical stirrer dengan kecepatan 400-500 rpm selama 30-45 menit pada suhu konstan 160-170°C. Selama proses pencampuran, dilakukan pengamatan terhadap proses swelling (pengembangan) partikel karet dan homogenitas campuran. Setelah tercapai homogenitas yang baik, aspal termodifikasi karet siap dicampurkan dengan agregat panas. Proses ini memungkinkan terjadinya interaksi fisiko-kimia antara serbuk karet dengan aspal, termasuk proses swelling partikel karet dan modifikasi struktur molekuler aspal (Utami et al., 2020; Mohammed & Joni, 2024).

Metode Pencampuran Kering (Dry Process) Pada metode pencampuran kering, serbuk karet alam dicampurkan langsung dengan agregat panas sebelum penambahan aspal. Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut: Agregat dipanaskan hingga mencapai suhu 170-180°C dalam oven. Serbuk karet alam dengan jumlah 30% atau 35% dari berat aspal rencana dicampurkan dengan agregat panas dalam mixer. Pencampuran agregat dan serbuk karet dilakukan selama 5-10 menit untuk memastikan distribusi yang merata. Aspal panas pada suhu 150-160°C kemudian ditambahkan ke dalam campuran agregat-karet. Pencampuran dilanjutkan selama 2-3 menit hingga semua partikel agregat dan karet terselimuti aspal secara merata. Metode ini lebih sederhana dan dapat diaplikasikan pada plant aspal konvensional tanpa memerlukan peralatan tambahan khusus (Cárdenas et al., 2020; Zhao et al., 2024).

Pembuatan Benda Uji Marshall

Benda uji Marshall dibuat dengan mengikuti standar SNI 06-2489-1991 dan ASTM D1559. Prosedur pembuatan benda uji adalah sebagai berikut: Agregat, filler, dan aspal (termodifikasi atau tidak) dipanaskan pada suhu mixing yang telah ditentukan. Pencampuran dilakukan dalam mixer hingga semua agregat terselimuti aspal secara merata. Campuran aspal panas dimasukkan ke dalam cetakan Marshall berdiameter 4 inci (101,6 mm). Pemadatan

dilakukan dengan Marshall Compactor sebanyak 75 kali tumbukan untuk setiap sisi (total 150 tumbukan). Benda uji dikeluarkan dari cetakan setelah dingin dan dibiarkan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum pengujian

Pengujian Marshall

Pengujian Marshall dilakukan sesuai dengan SNI 06-2489-1991 untuk menentukan karakteristik campuran aspal. Parameter yang diuji meliputi: Stabilitas Marshall: Nilai maksimum beban yang dapat ditahan benda uji pada suhu 60°C hingga terjadi kelelahan, diukur dalam satuan kg. Kelelahan (Flow): Deformasi vertikal yang terjadi pada saat benda uji mencapai stabilitas maksimum, diukur dalam satuan mm. Kepadatan (Density): Berat jenis bulk campuran yang diukur dengan metode SSD (Saturated Surface Dry), dinyatakan dalam gr/cm³. VIM (Void in Mix): Persentase volume rongga udara dalam campuran padat, dihitung berdasarkan berat jenis maksimum teoritis dan berat jenis bulk. VMA (Void in Mineral Aggregate): Persentase volume rongga dalam agregat yang terisi udara dan aspal. VFB (Void Filled with Bitumen): Persentase rongga dalam agregat yang terisi aspal. Marshall Quotient (MQ): Rasio antara stabilitas dengan kelelahan, yang mengindikasikan kekakuan campuran, dinyatakan dalam kg/mm.

Pengujian dilakukan pada suhu 60°C dengan kecepatan pembebanan 50 mm/menit. Setiap variasi diuji dengan tiga sampel replikasi dan hasilnya dirata-rata.

Analisis Data. Data hasil pengujian Marshall dianalisis untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) berdasarkan kriteria berikut: Kadar aspal pada stabilitas maksimum, Kadar aspal pada kepadatan maksimum, Kadar aspal pada VIM tengah (4%), Kadar aspal pada VMA minimum, Kadar aspal pada VFB tengah (65-75%).

Kadar aspal optimum ditentukan sebagai rata-rata dari kelima kriteria tersebut. Selanjutnya, karakteristik Marshall pada kadar aspal optimum dibandingkan dengan spesifikasi Bina Marga 2018 untuk AC-WC. Perbandingan performa antara metode pencampuran basah dan kering dilakukan melalui analisis statistik deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi pengaruh metode pencampuran dan kadar serbuk karet alam terhadap setiap parameter Marshall.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Marshall Metode Pencampuran Basah (Wet Process) Wet Process dengan Kadar Serbuk Karet 30% (WP 30%). Hasil pengujian Marshall untuk metode pencampuran basah dengan penambahan serbuk karet alam 30% menunjukkan karakteristik yang bervariasi pada setiap kadar aspal. Tabel 1 menyajikan hasil lengkap pengujian Marshall untuk WP 30% pada berbagai kadar aspal.

Tabel 1. Hasil Pengujian Marshall WP 30% SKAT

Parameter	Satuan	Kadar Aspal Rencana (%)					Syarat Bina Marga
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	
Kepadatan	gr/cm ³	2,268	2,256	2,276	2,266	2,261	-
VIM	%	5,498	4,104	3,036	2,067	4,942	3-5
VMA	%	16,077	16,312	15,946	16,132	15,583	Min. 15
VFB	%	65,799	74,939	81,090	87,187	68,284	Min. 65
Stabilitas	kg	839,47	915,78	994,64	893,16	847,10	Min. 800

Kelelehan	mm	2,90	3,41	4,00	4,90	2,90	2-4
MQ	kg/mm	289,47	268,54	248,66	182,28	302,54	Min. 250

Berdasarkan data pada Tabel 1, dapat diamati bahwa kepadatan campuran berkisar antara 2,256-2,276 gr/cm³, dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,0%. Nilai VIM menunjukkan tren penurunan dari 5,498% pada kadar aspal 5,0% menjadi 2,067% pada kadar aspal 6,5%, kemudian meningkat kembali menjadi 4,942% pada kadar aspal 7,0%. Pola ini mengindikasikan bahwa pada kadar aspal 6,5%, campuran mencapai tingkat kepadatan optimum dengan rongga udara minimum.

Stabilitas Marshall menunjukkan peningkatan dari 839,47 kg pada kadar aspal 5,0% menjadi maksimum 994,64 kg pada kadar aspal 6,0%, kemudian menurun pada kadar aspal yang lebih tinggi. Penurunan stabilitas pada kadar aspal 6,5% dan 7,0% mengindikasikan bahwa kelebihan aspal menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis dan mengurangi kekuatan internal campuran (Zhao et al., 2024). Namun, semua nilai stabilitas memenuhi persyaratan minimum 800 kg untuk AC-WC.

Kelelehan (flow) meningkat secara konsisten dari 2,90 mm pada kadar aspal 5,0% hingga mencapai maksimum 4,90 mm pada kadar aspal 6,5%. Nilai kelelehan pada kadar aspal 6,5% berada di luar spesifikasi (2-4 mm), yang mengindikasikan campuran cenderung lebih fleksibel namun berpotensi mengalami deformasi plastis yang lebih besar (Al-Fayyadh, 2023). Marshall Quotient (MQ) menunjukkan tren penurunan dengan meningkatnya kadar aspal, dengan nilai terendah 182,28 kg/mm pada kadar aspal 6,5%, yang berada di bawah persyaratan minimum 250 kg/mm.

Parameter volumetrik VMA berada dalam rentang 15,583-16,312%, memenuhi persyaratan minimum 15%. VFB menunjukkan peningkatan dari 65,799% pada kadar aspal 5,0% hingga maksimum 87,187% pada kadar aspal 6,5%, mengindikasikan bahwa rongga dalam agregat semakin terisi penuh oleh aspal. Nilai VFB yang tinggi pada kadar aspal 6,5% menunjukkan bahwa campuran memiliki durabilitas yang baik terhadap penetrasi air dan oksidasi (Hu et al., 2020).

Berdasarkan analisis keseluruhan parameter Marshall, kadar aspal optimum untuk WP 30% berada pada rentang 6,0-6,5%, dengan pertimbangan keseimbangan antara stabilitas, kelelehan, dan parameter volumetrik. Kadar aspal 6,5% memberikan VIM yang ideal (2,067%) dan VFB tertinggi (87,187%), meskipun dengan kelelehan yang sedikit melebihi spesifikasi.

Wet Process dengan Kadar Serbuk Karet 35% (WP 35%)

Hasil pengujian Marshall untuk metode pencampuran basah dengan penambahan serbuk karet alam 35% disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Marshall WP 35% SKAT

Parameter	Satuan	Kadar Aspal Rencana (%)					Syarat Bina Marga
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	AC-WC
Kepadatan	gr/cm ³	2,267	2,242	2,269	2,244	2,259	-
VIM	%	5,120	4,932	3,459	4,326	4,101	3-5
VMA	%	15,877	17,231	16,262	17,476	16,312	Min. 15
VFB	%	67,753	71,385	78,731	75,246	74,869	Min. 65
Stabilitas	kg	824,63	867,45	873,36	831,75	856,23	Min. 800
Kelelehan	mm	2,77	3,23	3,60	4,13	3,47	2-4

MQ	kg/mm	297,69	268,54	242,60	201,39	246,82	Min. 250
-----------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	----------

Penambahan serbuk karet hingga 35% menunjukkan pola karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan 30%. Kepadatan campuran berkisar antara 2,242-2,269 gr/cm³, dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,0%. Nilai VIM pada WP 35% relatif lebih tinggi dibandingkan WP 30%, berkisar antara 3,459-5,120%, dengan nilai terendah pada kadar aspal 6,0%.

Stabilitas Marshall pada WP 35% menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan WP 30%, dengan nilai maksimum 873,36 kg pada kadar aspal 6,0%. Penurunan stabilitas ini dapat dikaitkan dengan peningkatan kandungan serbuk karet yang menyebabkan modifikasi berlebihan pada binder, mengurangi kohesi internal campuran (Xie et al., 2024). Namun, semua nilai stabilitas masih memenuhi persyaratan minimum 800 kg.

Kelelehan pada WP 35% berkisar antara 2,77-4,13 mm, dengan nilai maksimum pada kadar aspal 6,5%. Sebagian besar nilai kelelehan berada dalam spesifikasi (2-4 mm), kecuali pada kadar aspal 6,5% yang sedikit melebihi batas atas. Marshall Quotient menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan WP 30%, dengan beberapa nilai di bawah persyaratan minimum 250 kg/mm, khususnya pada kadar aspal 6,0% (242,60 kg/mm) dan 6,5% (201,39 kg/mm). Parameter volumetrik VMA pada WP 35% cenderung lebih tinggi dibandingkan WP 30%, berkisar antara 15,877-17,476%, yang mengindikasikan struktur agregat yang lebih terbuka. VFB berkisar antara 67,753-78,731%, dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,0%, menunjukkan pengisian rongga agregat yang cukup baik oleh aspal termodifikasi.

Peningkatan kadar serbuk karet dari 30% menjadi 35% menghasilkan campuran yang lebih fleksibel namun dengan stabilitas yang lebih rendah. Hal ini konsisten dengan penelitian Mildawati et al. (2024) yang menunjukkan bahwa penambahan karet berlebihan dapat mengurangi stabilitas Marshall akibat modifikasi binder yang terlalu ekstensif. Kadar aspal optimum untuk WP 35% berada pada rentang 5,5-6,0%, dengan pertimbangan keseimbangan antara stabilitas dan parameter volumetrik.

Karakteristik Marshall Metode Pencampuran Kering (Dry Process)

Dry Process dengan Kadar Serbuk Karet 30% (DP 30%) Hasil pengujian Marshall untuk metode pencampuran kering dengan penambahan serbuk karet alam 30% disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Marshall DP 30% SKAT

Parameter	Satuan	Kadar Aspal Rencana (%)	Syarat Bina Marga				
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	AC-WC
Kepadatan	gr/cm ³	2,259	2,248	2,263	2,237	2,254	-
VIM	%	5,287	4,562	3,681	4,879	4,235	3-5
VMA	%	16,199	16,817	16,554	18,078	16,897	Min. 15
VFB	%	67,372	72,873	77,761	73,017	74,938	Min. 65
Stabilitas	kg	791,48	829,56	847,10	798,91	813,75	Min. 800
Kelelehan	mm	2,63	3,07	3,47	3,87	3,23	2-4
MQ	kg/mm	300,94	270,15	244,12	206,46	251,93	Min. 250

Metode pencampuran kering dengan kadar serbuk karet 30% menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan metode basah. Kepadatan campuran berkisar antara 2,237-2,263 gr/cm³,

dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,0%. Nilai VIM berkisar antara 3,681-5,287%, dengan nilai terendah pada kadar aspal 6,0% (3,681%). Stabilitas Marshall pada DP 30% menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan WP 30%, dengan nilai maksimum 847,10 kg pada kadar aspal 6,0%. Beberapa nilai stabilitas berada di bawah persyaratan minimum 800 kg, khususnya pada kadar aspal 5,0% (791,48 kg) dan 6,5% (798,91 kg). Penurunan stabilitas pada metode kering dapat dikaitkan dengan interaksi yang lebih terbatas antara serbuk karet dengan aspal, sehingga modifikasi binder tidak seefektif metode basah (Abbassi et al., 2024).

Kelelahan pada DP 30% berkisar antara 2,63-3,87 mm, dengan sebagian besar nilai berada dalam spesifikasi (2-4 mm). Marshall Quotient menunjukkan nilai yang bervariasi, dengan nilai terendah 206,46 kg/mm pada kadar aspal 6,5%, yang berada di bawah persyaratan minimum 250 kg/mm. Parameter volumetrik VMA pada DP 30% berkisar antara 16,199-18,078%, dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,5%, mengindikasikan struktur agregat yang relatif terbuka. VFB berkisar antara 67,372-77,761%, dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,0%, menunjukkan pengisian rongga agregat yang memadai.

Perbandingan antara DP 30% dan WP 30% menunjukkan bahwa metode basah menghasilkan stabilitas yang lebih tinggi (rata-rata 12% lebih tinggi) dan kepadatan yang lebih baik. Hal ini konsisten dengan penelitian Zhao et al. (2024) yang menunjukkan bahwa metode basah menghasilkan interaksi binder-karet yang lebih intensif, meningkatkan kohesi dan kekuatan campuran. Dry Process dengan Kadar Serbuk Karet 35% (DP 35%) Hasil pengujian Marshall untuk metode pencampuran kering dengan penambahan serbuk karet alam 35% disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Marshall DP 35% SKAT

Parameter	Satuan	Kadar Aspal Rencana (%)					Syarat Bina Marga
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	AC-WC
Kepadatan	gr/cm ³	2,254	2,235	2,257	2,229	2,247	-
VIM	%	5,456	5,123	4,087	5,234	4,562	3-5
VMA	%	16,453	17,456	16,987	18,567	17,231	Min. 15
VFB	%	66,843	70,657	75,943	71,812	73,523	Min. 65
Stabilitas	kg	768,92	802,34	819,67	775,48	791,23	Min. 800
Kelelahan	mm	2,50	2,93	3,33	3,70	3,10	2-4
MQ	kg/mm	307,57	273,88	246,15	209,59	255,23	Min. 250

Penambahan serbuk karet hingga 35% pada metode kering menunjukkan penurunan performa yang lebih signifikan dibandingkan dengan 30%. Kepadatan campuran berkisar antara 2,229-2,257 gr/cm³, lebih rendah dibandingkan DP 30%. Nilai VIM berkisar antara 4,087-5,456%, dengan nilai terendah pada kadar aspal 6,0%.

Stabilitas Marshall pada DP 35% menunjukkan nilai yang paling rendah di antara semua variasi, dengan nilai maksimum hanya 819,67 kg pada kadar aspal 6,0%. Sebagian besar nilai stabilitas berada di bawah persyaratan minimum 800 kg, mengindikasikan bahwa kombinasi metode kering dengan kadar serbuk karet 35% tidak optimal untuk aplikasi AC-WC. Penurunan stabilitas yang signifikan ini dapat dikaitkan dengan distribusi serbuk karet yang tidak merata dan interaksi yang terbatas dengan aspal pada metode kering (Kumar et al., 2022).

Kelelahan pada DP 35% berkisar antara 2,50-3,70 mm, dengan semua nilai berada dalam spesifikasi (2-4 mm). Marshall Quotient menunjukkan nilai yang bervariasi, dengan beberapa nilai mendekati batas minimum 250 kg/mm. Parameter volumetrik VMA pada DP 35%

cenderung tinggi, berkisar antara 16,453-18,567%, mengindikasikan struktur agregat yang sangat terbuka dan potensi durabilitas yang lebih rendah. VFB berkisar antara 66,843-75,943%, dengan nilai yang relatif lebih rendah dibandingkan variasi lainnya.

Perbandingan Karakteristik Metode Wet dan Dry Process

Perbandingan komprehensif antara metode pencampuran basah dan kering pada kadar aspal optimum masing-masing variasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Karakteristik Marshall pada Kadar Aspal Optimum

Parameter	Satuan	WP 30%	WP 35%	DP 30%	DP 35%	Syarat
Kadar Aspal Optimum	%	6,5	6,0	6,0	6,0	-
Kepadatan	gr/cm ³	2,266	2,269	2,263	2,257	-
VIM	%	2,067	3,459	3,681	4,087	3-5
VMA	%	16,132	16,262	16,554	16,987	Min. 15
VFB	%	87,187	78,731	77,761	75,943	Min. 65
Stabilitas	kg	893,16	873,36	847,10	819,67	Min. 800
Kelelehan	mm	4,90	3,60	3,47	3,33	2-4
MQ	kg/mm	182,28	242,60	244,12	246,15	Min. 250

Berdasarkan Tabel 5, dapat diamati bahwa metode pencampuran basah dengan kadar serbuk karet 30% (WP 30%) menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 893,16 kg, yang 5,4% lebih tinggi dibandingkan WP 35%, 5,4% lebih tinggi dibandingkan DP 30%, dan 9,0% lebih tinggi dibandingkan DP 35%. Keunggulan stabilitas pada WP 30% dapat dikaitkan dengan proses swelling dan interaksi molekuler yang optimal antara serbuk karet dengan aspal selama pencampuran basah, yang menghasilkan modifikasi binder yang lebih efektif (Mohammed & Joni, 2024; Šernas et al., 2023).

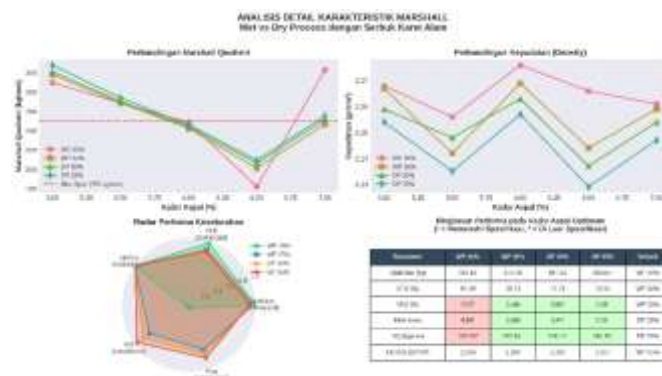
Kepadatan campuran menunjukkan perbedaan yang relatif kecil antara metode basah dan kering, namun metode basah cenderung menghasilkan kepadatan yang sedikit lebih tinggi. WP 35% menunjukkan kepadatan tertinggi (2,269 gr/cm³), diikuti oleh WP 30% (2,266 gr/cm³), DP 30% (2,263 gr/cm³), dan DP 35% (2,257 gr/cm³). Perbedaan kepadatan ini mengindikasikan bahwa metode basah menghasilkan campuran yang lebih kompak dan homogen (Abbassi et al., 2024).

Parameter VIM menunjukkan perbedaan yang signifikan antara metode basah dan kering. WP 30% menghasilkan VIM terendah (2,067%), yang berada di bawah spesifikasi minimum 3%, mengindikasikan campuran yang sangat padat. Nilai VIM yang rendah ini dapat meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air tetapi berpotensi mengurangi workability dan meningkatkan risiko bleeding pada suhu tinggi (Hu et al., 2020). Sebaliknya, metode kering menghasilkan VIM yang lebih tinggi dan lebih sesuai dengan spesifikasi, dengan DP 30% menghasilkan VIM 3,681% dan DP 35% menghasilkan VIM 4,087%.

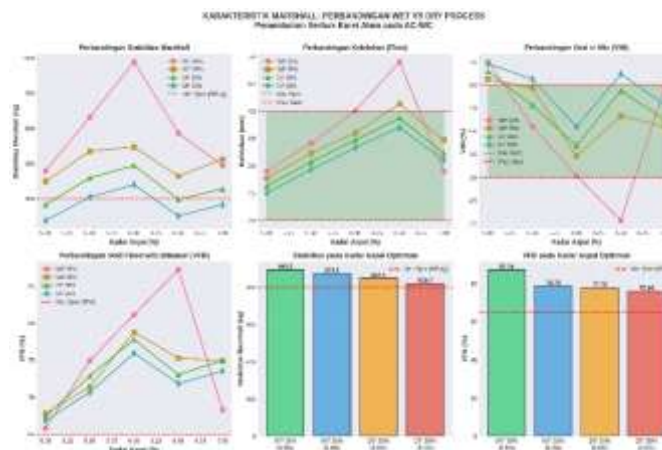
VMA menunjukkan tren peningkatan dari metode basah ke metode kering, dengan WP 30% menghasilkan VMA terendah (16,132%) dan DP 35% menghasilkan VMA tertinggi (16,987%). Semua nilai VMA memenuhi persyaratan minimum 15%. VFB menunjukkan perbedaan yang signifikan, dengan WP 30% menghasilkan VFB tertinggi (87,187%), yang mengindikasikan pengisian rongga agregat yang sangat baik oleh aspal termodifikasi. Nilai VFB yang tinggi ini berkorelasi dengan durabilitas yang lebih baik terhadap oksidasi dan penetrasi air (Al-Fayyadh, 2023).

Kelelahan (flow) menunjukkan variasi yang menarik, dengan WP 30% menghasilkan kelelahan tertinggi (4,90 mm), yang melebihi spesifikasi maksimum 4 mm. Kelelahan yang tinggi ini mengindikasikan bahwa campuran WP 30% memiliki fleksibilitas yang sangat baik, yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak lelah, namun berpotensi mengalami deformasi plastis yang lebih besar pada beban lalu lintas tinggi (Candra & Siswanto, 2019). Metode kering menghasilkan kelelahan yang lebih rendah dan lebih sesuai dengan spesifikasi, dengan DP 35% menghasilkan kelelahan terendah (3,33 mm).

Marshall Quotient (MQ) menunjukkan pola yang berbeda, dengan WP 30% menghasilkan MQ terendah (182,28 kg/mm), yang berada di bawah persyaratan minimum 250 kg/mm. Nilai MQ yang rendah ini mengindikasikan bahwa campuran WP 30% cenderung lebih fleksibel dan kurang kaku dibandingkan variasi lainnya. Sebaliknya, metode kering dan WP 35% menghasilkan MQ yang lebih tinggi dan lebih mendekati persyaratan, mengindikasikan keseimbangan yang lebih baik antara stabilitas dan kelelahan.



Gambar 1. Analisis Detail Karakteristik Marshall



Gambar 2. Karakteristik Marshall: Perbandingan Wet Vs Dry Process

Analisis Pengaruh Metode Pencampuran terhadap Karakteristik Binder

Perbedaan karakteristik Marshall antara metode basah dan kering dapat dijelaskan melalui mekanisme interaksi yang berbeda antara serbuk karet dengan aspal. Pada metode basah, serbuk karet mengalami proses swelling (pengembangan) akibat absorpsi komponen ringan aspal (maltenes) ke dalam struktur polimer karet pada suhu tinggi (160-170°C) selama 30-45 menit (Utami et al., 2020). Proses ini menyebabkan perubahan struktur molekuler aspal, peningkatan viskositas, dan modifikasi sifat reologi binder secara fundamental (Zhao et al., 2024).

Penelitian Šernas et al. (2023) menunjukkan bahwa metode basah menghasilkan peningkatan titik lembek aspal hingga 15-20°C dan penurunan penetrasi hingga 30-40%, mengindikasikan peningkatan kekakuan binder yang signifikan. Peningkatan kekakuan ini berkontribusi pada stabilitas Marshall yang lebih tinggi dan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen (rutting) pada suhu tinggi. Namun, peningkatan kekakuan yang berlebihan dapat mengurangi fleksibilitas campuran pada suhu rendah dan meningkatkan risiko retak termal (Xie et al., 2024).

Pada metode kering, serbuk karet tidak mengalami proses swelling yang intensif karena waktu kontak dengan aspal panas yang relatif singkat (2-3 menit) dan suhu pencampuran yang lebih rendah. Dalam metode ini, serbuk karet bertindak lebih sebagai filler atau pengganti sebagian agregat halus, dengan interaksi fisiko-kimia yang terbatas dengan aspal (Cárdenas et al., 2020). Akibatnya, modifikasi binder pada metode kering tidak seintensif metode basah, yang tercermin pada stabilitas yang lebih rendah dan karakteristik volumetrik yang berbeda.

Penelitian Khan et al. (2024) menunjukkan bahwa metode basah menghasilkan peningkatan parameter reologi seperti complex modulus (G^*) dan zero shear viscosity (ZSV) yang lebih signifikan dibandingkan metode kering. Peningkatan parameter reologi ini berkorelasi positif dengan ketahanan terhadap rutting dan performa pada suhu tinggi. Namun, metode basah juga dapat menghasilkan binder yang lebih rentan terhadap aging (penuaan) jangka pendek akibat paparan suhu tinggi yang lebih lama selama proses pencampuran (Xie et al., 2024).

Pengaruh Kadar Serbuk Karet terhadap Performa Campuran

Peningkatan kadar serbuk karet dari 30% menjadi 35% menghasilkan pengaruh yang berbeda pada metode basah dan kering. Pada metode basah, peningkatan kadar serbuk karet menyebabkan penurunan stabilitas dari 893,16 kg (WP 30%) menjadi 873,36 kg (WP 35%), atau penurunan sebesar 2,2%. Penurunan ini dapat dikaitkan dengan modifikasi binder yang berlebihan, di mana kandungan karet yang terlalu tinggi menyebabkan peningkatan viskositas yang ekstrem dan mengurangi workability campuran (Mildawati et al., 2024).

Penelitian Hu et al. (2020) menunjukkan bahwa terdapat kadar optimum serbuk karet untuk setiap jenis aspal dan metode pencampuran, di mana penambahan karet di atas kadar optimum dapat menyebabkan penurunan performa campuran. Kadar optimum ini bervariasi tergantung pada karakteristik aspal dasar, ukuran partikel karet, dan parameter pencampuran. Untuk serbuk karet alam dengan metode basah, kadar optimum yang dilaporkan dalam literatur berkisar antara 20-35% dari berat aspal (Lee & Le, 2023; Mohammed & Joni, 2024).

Pada metode kering, peningkatan kadar serbuk karet juga menyebabkan penurunan stabilitas dari 847,10 kg (DP 30%) menjadi 819,67 kg (DP 35%), atau penurunan sebesar 3,2%. Penurunan yang lebih besar pada metode kering mengindikasikan bahwa distribusi serbuk karet yang tidak merata menjadi lebih problematis pada kadar yang lebih tinggi. Kumar et al. (2022) melaporkan bahwa pada metode kering, kadar serbuk karet yang terlalu tinggi dapat menyebabkan clustering (penggumpalan) partikel karet dan mengurangi homogenitas campuran.

Parameter volumetrik juga dipengaruhi oleh kadar serbuk karet. Peningkatan kadar serbuk karet cenderung meningkatkan VIM dan VMA, yang dapat dikaitkan dengan kesulitan pemadatan akibat peningkatan viskositas campuran dan elastisitas yang lebih tinggi (Al-Fayyadh, 2023). Namun, peningkatan VFB pada kadar serbuk karet yang lebih tinggi

mengindikasikan bahwa rongga dalam agregat semakin terisi penuh oleh aspal termodifikasi, yang dapat meningkatkan durabilitas campuran.

Implikasi Praktis dan Rekomendasi Aplikasi

Berdasarkan hasil penelitian, metode pencampuran basah dengan kadar serbuk karet alam 30% (WP 30%) pada kadar aspal optimum 6,5% memberikan performa terbaik dalam hal stabilitas (893,16 kg) dan VFB (87,187%). Namun, kelelahan yang melebihi spesifikasi (4,90 mm) dan MQ yang rendah (182,28 kg/mm) menjadi pertimbangan penting dalam aplikasi praktis. Campuran dengan kelelahan tinggi dan MQ rendah cenderung lebih fleksibel dan dapat memberikan ketahanan yang baik terhadap retak lelah, tetapi berpotensi mengalami deformasi plastis yang lebih besar pada kondisi beban lalu lintas tinggi dan suhu tinggi (Candra & Siswanto, 2019).

Untuk aplikasi pada jalan dengan volume lalu lintas sedang hingga tinggi, disarankan untuk melakukan penyesuaian kadar aspal atau kadar serbuk karet untuk mencapai keseimbangan yang lebih baik antara stabilitas dan kelelahan. Penelitian Lee & Le (2023) menunjukkan bahwa penambahan polimer SBS dalam kombinasi dengan serbuk karet dapat meningkatkan MQ dan mengurangi kelelahan tanpa mengorbankan stabilitas secara signifikan.

Metode pencampuran kering dengan kadar serbuk karet 30% (DP 30%) dapat menjadi alternatif yang lebih praktis untuk implementasi di plant aspal konvensional, meskipun dengan performa yang sedikit lebih rendah dibandingkan metode basah. Stabilitas DP 30% (847,10 kg) masih memenuhi persyaratan minimum dan kelelahan (3,47 mm) berada dalam spesifikasi. Keunggulan metode kering terletak pada kemudahan implementasi, waktu pencampuran yang lebih singkat, dan tidak memerlukan peralatan khusus untuk modifikasi binder (Abbassi et al., 2024; Zhao et al., 2024).

Untuk meningkatkan performa metode kering, beberapa strategi dapat diterapkan, antara lain: Optimasi ukuran partikel: Penggunaan serbuk karet dengan ukuran partikel yang lebih halus (lolos saringan No. 60 atau lebih kecil) dapat meningkatkan dispersi dan interaksi dengan aspal (Cárdenas et al., 2020). Pre-treatment serbuk karet: Perlakuan awal serbuk karet dengan aktivator kimia atau proses devulkanisasi parsial dapat meningkatkan reaktivitas dan kompatibilitas dengan aspal (Xie et al., 2024). Penggunaan pellet atau masterbatch: Teknologi pellet aspal-karet atau masterbatch dapat menjembatani kesenjangan performa antara metode basah dan kering dengan memungkinkan injeksi langsung ke plant konvensional sambil mempertahankan karakteristik modifikasi binder yang baik (Abbassi et al., 2024). Optimasi parameter pencampuran: Peningkatan waktu pencampuran kering dari 5-10 menit menjadi 10-15 menit dan peningkatan suhu pencampuran dapat meningkatkan interaksi antara serbuk karet dengan aspal (Zhao et al., 2024).

Pertimbangan Lingkungan dan Ekonomi

Penggunaan serbuk karet alam sebagai modifier aspal memberikan manfaat lingkungan yang signifikan melalui pemanfaatan sumber daya terbarukan dan pengurangan ketergantungan pada modifier sintetis seperti SBS polymer yang berbasis petroleum (Lee & Le, 2023). Indonesia sebagai salah satu produsen karet alam terbesar di dunia memiliki keunggulan komparatif dalam pengembangan teknologi ini, dengan potensi untuk meningkatkan nilai tambah produk karet nasional.

Dari aspek ekonomi, biaya serbuk karet alam umumnya lebih rendah dibandingkan dengan polimer sintetis, dengan harga berkisar antara 50-70% dari harga SBS polymer (Mohammed & Joni, 2024). Namun, metode pencampuran basah memerlukan investasi tambahan untuk peralatan pencampuran khusus dan biaya operasional yang lebih tinggi akibat konsumsi energi yang lebih besar dan waktu pencampuran yang lebih lama. Analisis ekonomi perlu mempertimbangkan trade-off antara biaya investasi awal dengan manfaat jangka panjang berupa peningkatan durabilitas dan pengurangan biaya pemeliharaan perkerasan.

Studi kelayakan ekonomi oleh Hu et al. (2020) menunjukkan bahwa meskipun biaya awal modifikasi aspal dengan karet lebih tinggi sekitar 15-25% dibandingkan aspal konvensional, peningkatan masa layan perkerasan dapat mencapai 30-50%, sehingga menghasilkan life-cycle cost yang lebih rendah. Untuk konteks Indonesia, analisis ekonomi perlu mempertimbangkan faktor lokal seperti ketersediaan material, biaya transportasi, dan kondisi iklim tropis yang dapat mempengaruhi performa jangka panjang.

Keterbatasan Penelitian dan Rekomendasi Penelitian Lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Pertama, penelitian hanya menggunakan pengujian Marshall sebagai indikator performa campuran, tanpa melakukan pengujian performa lanjutan seperti wheel tracking test untuk ketahanan rutting, indirect tensile strength test untuk ketahanan retak lelah, dan moisture susceptibility test untuk ketahanan terhadap kerusakan akibat air. Penelitian lanjutan perlu melakukan pengujian performa komprehensif untuk validasi hasil Marshall.

Kedua, penelitian tidak melakukan karakterisasi binder secara detail, seperti pengujian penetrasi, titik lembek, viskositas, dan pengujian reologi menggunakan Dynamic Shear Rheometer (DSR). Karakterisasi binder penting untuk memahami mekanisme modifikasi yang terjadi pada level molekuler dan memprediksi performa jangka panjang (Khan et al., 2024). Penelitian lanjutan perlu melakukan karakterisasi binder lengkap untuk mengkorelasikan sifat binder dengan performa campuran.

Ketiga, penelitian tidak melakukan evaluasi performa jangka panjang melalui aging simulation atau field trial. Penelitian Xie et al. (2024) menunjukkan bahwa performa aspal termodifikasi karet dapat berubah signifikan setelah aging, dengan metode basah cenderung lebih rentan terhadap aging jangka pendek tetapi lebih stabil pada aging jangka panjang. Penelitian lanjutan perlu melakukan simulasi aging menggunakan Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) dan Pressure Aging Vessel (PAV), serta melakukan monitoring performa lapangan.

Keempat, penelitian hanya menggunakan satu jenis aspal dasar (penetrasi 60/70) dan satu ukuran partikel serbuk karet (lolos saringan No. 40). Penelitian lanjutan perlu mengevaluasi pengaruh grade aspal yang berbeda dan variasi ukuran partikel karet untuk mengoptimalkan performa modifikasi. Penelitian Cárdenas et al. (2020) menunjukkan bahwa ukuran partikel karet memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas modifikasi, dengan partikel yang lebih halus umumnya menghasilkan dispersi yang lebih baik dan interaksi yang lebih intensif dengan aspal.

Kelima, penelitian tidak melakukan analisis mikrostruktur menggunakan teknik seperti Scanning Electron Microscopy (SEM) atau Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk memahami mekanisme interaksi antara serbuk karet dengan aspal pada level molekuler.

Penelitian lanjutan dengan pendekatan multi-skala dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme modifikasi dan mengoptimalkan parameter proses.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa: Metode pencampuran basah (wet process) menghasilkan performa superior dibandingkan metode pencampuran kering (dry process) dalam hal stabilitas Marshall dan karakteristik volumetrik. Metode pencampuran basah dengan kadar serbuk karet alam 30% (WP 30%) pada kadar aspal optimum 6,5% menghasilkan stabilitas tertinggi sebesar 893,16 kg, yang 5,4% lebih tinggi dibandingkan metode kering dengan kadar serbuk karet yang sama. Karakteristik Marshall pada kadar aspal optimum untuk WP 30% menunjukkan kepadatan 2,266 gr/cm³, VIM 2,07%, VMA 16,13%, VFB 87,19%, kelelahan 4,90 mm, dan Marshall Quotient 182,28 kg/mm. Meskipun kelelahan dan MQ tidak memenuhi spesifikasi secara penuh, stabilitas dan parameter volumetrik menunjukkan performa yang sangat baik. Peningkatan kadar serbuk karet alam dari 30% menjadi 35% menyebabkan penurunan stabilitas pada kedua metode pencampuran. Pada metode basah, stabilitas menurun dari 893,16 kg (WP 30%) menjadi 873,36 kg (WP 35%), sedangkan pada metode kering menurun dari 847,10 kg (DP 30%) menjadi 819,67 kg (DP 35%). Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat kadar optimum serbuk karet untuk mencapai performa maksimal, dan penambahan berlebihan dapat mengurangi stabilitas campuran.

Metode pencampuran basah menghasilkan modifikasi binder yang lebih efektif melalui proses swelling dan interaksi fisiko-kimia intensif antara serbuk karet dengan aspal pada suhu tinggi (160-170°C) selama 30-45 menit. Hal ini menghasilkan peningkatan kekakuan binder, ketahanan terhadap deformasi permanen, dan pengisian rongga agregat yang lebih baik (VFB 87,19%) dibandingkan metode kering. Metode pencampuran kering dengan kadar serbuk karet 30% (DP 30%) masih menghasilkan performa yang memenuhi persyaratan minimum untuk AC-WC, dengan stabilitas 847,10 kg dan kelelahan 3,47 mm yang berada dalam spesifikasi. Metode ini dapat menjadi alternatif praktis untuk implementasi di plant aspal konvensional dengan kemudahan operasional dan biaya investasi yang lebih rendah. Parameter volumetrik menunjukkan bahwa metode basah menghasilkan campuran yang lebih padat dengan VIM yang lebih rendah dan VFB yang lebih tinggi, mengindikasikan durabilitas yang lebih baik terhadap penetrasi air dan oksidasi. Namun, VIM yang terlalu rendah (2,07% pada WP 30%) dapat berpotensi menyebabkan bleeding pada suhu tinggi dan mengurangi workability campuran.

REFERENSI

- Abbassi, P. H., Kavussi, A., & Kazemian, F. (2024). Comparison of asphalt mixes containing reacted and activated crumb rubber (RAR) and CRM binders. *Advances in Civil Engineering*, 2024, Article 6174414. <https://doi.org/10.1155/adce/6174414>
- Al-Fayyadh, Z. T. (2023). The effect of rubber crumbs on Marshall properties for warm mix asphalt. *Journal of Engineering*, 29(6), 40–53. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.06.04>
- Candra, P. R., & Siswanto, H. (2019). Marshall characteristics of asphalt concrete wearing course using crumb rubber modified of motorcycle tire waste as additive. *Materials Science Forum*, 961, 57–64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.961.57>

- Cárdenas, J. C. R., Lozano, D. A., Moreno, L. A., & Leguizamón, J. A. (2020). Asphalts and modified dense bituminous mixtures with rubber of military boots. *DYNA*, 87(212), 155–163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78135>
- Hu, X., Li, S., Peng, H., & Shan, J. (2020). Gradation design and performance evaluation of high viscosity asphalt mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2020, Article 4951951. <https://doi.org/10.1155/2020/4951951>
- Khan, I., Ahmad, Z., Khan, M. I., Yasin, S., & Ullah, S. (2024). Evaluating and optimizing NBR-modified bituminous mixes: A rheological and RSM-based study. *Scientific Reports*, 14(1), Article 24827. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75679-5>
- Kumar, A., Choudhary, R., & Kumar, A. (2022). Utilization of waste ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) rubber modified binder in asphalt concrete mixtures. In *Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Geotechnics* (pp. 365–376). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9921-4_35
- Lee, J.-S., Lee, S.-Y., Bae, Y.-S., Yoo, P.-J., & Kwon, S.-A. (2023). Development of pavement material using crumb rubber modifier and graphite nanoplatelet for pellet asphalt production. *Polymers*, 15(3), Article 727. <https://doi.org/10.3390/polym15030727>
- Lee, S.-Y., & Le, T. H. M. (2023). Laboratory and full-scale testbed study in the feasibility of styrene-butadiene-styrene asphalt pavement having epoxy resin and crumb rubber powder. *Buildings*, 13(3), Article 652. <https://doi.org/10.3390/buildings13030652>
- Mildawati, R., Dewi, S. H., & Syahputra, M. R. (2024). Pengaruh penambahan karet remah S20 sebagai bahan penambah aspal pada campuran asphalt concrete wearing course (AC-WC). *Konteks: Jurnal Penelitian Sosial dan Humaniora*, 1(6), 1–10. <https://doi.org/10.62603/konteks.v1i6.130>
- Mohammed, H. H., & Joni, H. H. (2024). Impact assessment of mixing conditions on rubberized asphalt binder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1374(1), Article 012079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1374/1/012079>
- Šernas, O., Vaitkus, A., & Škuldeckė, J. (2023). Performance of crumb rubber bitumen and asphalt modified in the wet process alone and in combination with SBS polymer. *Road Materials and Pavement Design*, 24(5), 1234–1252. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2180294>
- Utami, F., Subagio, B. S., & Kusumawati, A. (2020). Evaluation of the performance of hot mix asphalt with natural rubber (latex) for asphalt concrete-binder course (AC-BC). *Journal of Transportation Systems*, 27(3), 189–202. <https://doi.org/10.5614/JTS.2020.27.3.2>
- Xie, S., Cheng, Z., Zhou, Y., Wang, H., & Zhang, Y. (2024). Performance of asphalt mixtures modified with desulfurized rubber and rock asphalt composites. *Buildings*, 14(9), Article 3026. <https://doi.org/10.3390/buildings14093026>
- Zhao, Z., Wu, S., Xie, J., Yang, C., Yang, X., & Wang, F. (2024). Effect of direct addition of asphalt rubber pellets on mixing, performance and VOCs of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 411, Article 134494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134494>

