



Pengaruh Penambahan Limbah Serbuk Kayu Bangkirai dan Pasir Karjon terhadap Karakteristik Marshall Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)

Adela Berliana¹, Shinta Dwi Oktavia², Juny Andry Sulisty³

^{1,2,3}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

¹ adelaberliana214@gmail.com, ² shintadwi454@gmail.com

Abstrak

Perkerasan jalan umumnya menggunakan lapisan Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) sebagai lapisan aus yang berfungsi menerima beban lalu lintas secara langsung serta melindungi lapisan struktur di bawahnya dari pengaruh cuaca dan air. Peningkatan volume dan beban kendaraan menuntut campuran AC-WC memiliki stabilitas, fleksibilitas, dan durabilitas yang baik. Di sisi lain, penggunaan material konvensional secara terus-menerus berpotensi meningkatkan eksploitasi sumber daya alam, sehingga diperlukan inovasi material alternatif yang lebih berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan limbah serbuk kayu bangkirai sebagai bahan tambah dan pasir karjon sebagai substitusi sebagian agregat halus terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan pembuatan 48 benda uji berdasarkan variasi kadar pasir karjon 0%, 2%, 4%, dan 6% serta limbah serbuk kayu bangkirai 0%, 1%, 3%, dan 5%. Pengujian Marshall dilakukan untuk memperoleh parameter VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil penelitian menunjukkan seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan teknis. Komposisi optimum diperoleh pada campuran 2% pasir karjon dan 5% limbah serbuk kayu bangkirai (P2S5%) dengan nilai stabilitas 958,14 kg, flow 3,13 mm, VIM 3,85%, VMA 22,37%, VFB 82,78%, dan Marshall Quotient 305,90 kg/mm. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan material alternatif tersebut efektif meningkatkan kinerja campuran AC-WC serta berpotensi mendukung konstruksi perkerasan jalan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci: AC-WC, Marshall, Pasir Karjon, Limbah Serbuk Kayu Bangkirai

1. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur jalan yang berkelanjutan menjadi salah satu tantangan utama dalam bidang teknik sipil seiring dengan meningkatnya pertumbuhan lalu lintas dan kebutuhan mobilitas masyarakat. Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) sebagai lapisan aus merupakan bagian terluar dari struktur perkerasan lentur yang berfungsi menerima beban lalu lintas secara langsung, memberikan kenyamanan berkendara, serta melindungi lapisan di bawahnya dari pengaruh air dan perubahan suhu. Oleh karena itu, campuran AC-WC dituntut memiliki stabilitas yang tinggi, ketahanan terhadap deformasi permanen, fleksibilitas yang memadai, serta durabilitas terhadap faktor lingkungan. Peningkatan beban kendaraan dari waktu ke waktu menuntut adanya inovasi dalam perancangan campuran agar tetap memenuhi spesifikasi teknis yang berlaku.

Di sisi lain, penggunaan agregat alam dan material konvensional secara terus-menerus dalam campuran aspal berpotensi mempercepat eksploitasi sumber daya alam dan menimbulkan dampak lingkungan. Konsep pembangunan berkelanjutan mendorong pemanfaatan material alternatif, khususnya material lokal dan limbah industri, sebagai substitusi atau bahan tambah dalam campuran aspal. Pemanfaatan limbah tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan pencemaran lingkungan, tetapi juga dapat meningkatkan nilai guna material yang sebelumnya tidak dimanfaatkan secara optimal. Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan limbah seperti abu sekam padi, serbuk kayu, dan limbah pemotongan kayu sebagai filler atau bahan tambah dalam campuran Asphalt Concrete. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa material limbah tertentu mampu meningkatkan parameter Marshall, terutama stabilitas dan Marshall Quotient, apabila digunakan dalam proporsi yang tepat. Selain itu, pemanfaatan agregat lokal sebagai substitusi agregat halus juga dilaporkan dapat memenuhi spesifikasi teknis apabila karakteristik fisik dan gradasinya sesuai standar.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada satu jenis material limbah atau satu jenis substitusi agregat secara terpisah. Kajian mengenai kombinasi antara limbah serbuk kayu dan agregat halus lokal dalam satu sistem campuran AC-WC masih relatif terbatas, khususnya yang dianalisis berdasarkan parameter Marshall sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Pasir karjon yang berasal dari daerah Gunung Wungkal, Kabupaten Pati, memiliki potensi sebagai agregat halus alternatif karena ketersediaannya yang melimpah dan kedekatannya dengan lokasi penelitian. Sementara itu, limbah serbuk kayu bangkirai dari industri meubel merupakan material sisa produksi yang belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Kombinasi kedua material tersebut diperkirakan dapat mempengaruhi karakteristik volumetrik dan mekanis campuran AC-WC, baik dari aspek rongga campuran maupun ketahanan terhadap beban.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian terkait evaluasi simultan penggunaan pasir karjon sebagai substitusi agregat halus dan limbah serbuk kayu bangkirai sebagai bahan tambah dalam campuran AC-WC. Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui pengujian kombinasi kedua material alternatif tersebut dalam beberapa variasi kadar serta analisis komprehensif terhadap parameter Marshall untuk menentukan komposisi campuran optimum. Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh substitusi pasir karjon dan penambahan limbah serbuk kayu bangkirai terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC serta menentukan komposisi yang memberikan kinerja terbaik dan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium yang dilaksanakan di Laboratorium Perkerasan Jalan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Objek penelitian adalah campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dengan sistem pencampuran aspal panas (hot mix asphalt). Penelitian dilakukan dalam dua tahap utama, yaitu penentuan kadar aspal optimum (KAO) pada campuran normal dan pengujian campuran modifikasi menggunakan substitusi pasir karjon serta penambahan limbah serbuk kayu bangkirai.

Tahap awal penelitian adalah pemeriksaan sifat fisik material penyusun campuran. Agregat kasar dan agregat halus diuji berdasarkan standar SNI dan ASTM yang berlaku, meliputi analisis saringan, berat jenis, penyerapan air, dan keausan agregat. Aspal penetrasi 60/70 yang diperoleh dari Asphalt Mixing Plant (AMP) PT. Deltamarga Adyatama Batang diuji penetrasi, titik lembek, dan berat jenisnya untuk memastikan kesesuaian terhadap spesifikasi. Pasir karjon yang berasal dari Gunung Wungkal, Kabupaten Pati, diuji gradasi dan berat jenisnya sebelum digunakan sebagai substitusi agregat halus. Limbah serbuk kayu bangkirai yang diperoleh dari industri meubel di Kecamatan Jakenan, Kabupaten Pati, dikeringkan menggunakan oven pada suhu $\pm 105^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai kondisi kering oven, kemudian diayak agar memperoleh ukuran partikel yang seragam sebelum dicampurkan ke dalam campuran aspal.

Penentuan kadar aspal optimum dilakukan pada campuran normal tanpa substitusi dan tanpa bahan tambah. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6% terhadap berat total campuran. Untuk setiap variasi kadar aspal dibuat tiga benda uji sehingga total benda uji pada tahap ini berjumlah 15 spesimen. Agregat dipanaskan pada suhu $\pm 150\text{--}160^{\circ}\text{C}$ dan aspal dipanaskan pada suhu $\pm 145\text{--}155^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai viskositas pencampuran yang sesuai. Proses pencampuran dilakukan secara manual hingga seluruh agregat terlapisi aspal secara merata. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam cetakan Marshall berdiameter 10,16 cm dengan tinggi standar $\pm 6,35$ cm.

Pemadatan dilakukan menggunakan alat pemadat Marshall dengan jumlah tumbukan sesuai spesifikasi untuk lalu lintas sedang, yaitu 75 tumbukan pada masing-masing sisi benda uji. Setelah pemadatan, benda uji dikeluarkan dari cetakan menggunakan ejector dan didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian berat jenis dan parameter Marshall. Nilai KAO ditentukan berdasarkan grafik hubungan kadar aspal terhadap stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFB sesuai kriteria Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Setelah diperoleh kadar aspal optimum, tahap berikutnya adalah pembuatan campuran modifikasi dengan substitusi pasir karjon dan penambahan limbah serbuk kayu bangkirai. Pasir karjon digunakan sebagai substitusi agregat halus dengan variasi kadar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap berat agregat halus. Limbah serbuk kayu bangkirai ditambahkan dengan variasi kadar 0%, 1%, 3%, dan 5% terhadap berat total campuran. Setiap kombinasi

variasi dibuat tiga benda uji sebagai replikasi untuk memastikan konsistensi data. Total keseluruhan benda uji dalam penelitian ini berjumlah 48 spesimen, termasuk campuran normal dan campuran modifikasi.

Proses pencampuran campuran modifikasi dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pada campuran normal, dengan penambahan pasir karjon pada fraksi agregat halus dan penambahan limbah serbuk kayu bangkirai pada tahap pencampuran kering sebelum aspal ditambahkan. Seluruh campuran dipanaskan pada rentang suhu yang sama untuk menjaga konsistensi kondisi pencampuran. Pemasatan dilakukan menggunakan prosedur Marshall yang sama, yaitu 75 tumbukan per sisi.

Pengujian berat jenis campuran (bulk specific gravity) dilakukan sebelum pengujian stabilitas dan flow. Untuk pengujian Marshall, setiap benda uji direndam dalam waterbath pada suhu 60°C selama 30–40 menit sebelum diuji menggunakan alat Marshall. Parameter yang diperoleh dari pengujian ini meliputi stabilitas (kg), flow (mm), serta perhitungan Marshall Quotient (MQ). Selain itu, parameter volumetrik yang dihitung meliputi Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB) berdasarkan data berat jenis dan komposisi campuran.

Seluruh data hasil pengujian dicatat dan dirata-ratakan dari tiga replikasi pada setiap variasi campuran. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil parameter Marshall terhadap batas spesifikasi yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Komposisi optimum ditentukan berdasarkan campuran yang memenuhi seluruh parameter teknis serta menunjukkan kinerja stabilitas dan Marshall Quotient yang paling efektif.

Metode ini dirancang agar dapat direplikasi dengan kondisi laboratorium yang setara, menggunakan prosedur pencampuran, pepadatan, dan pengujian yang mengacu pada standar yang berlaku. Dengan pendekatan eksperimental terkontrol dan jumlah replikasi yang konsisten, penelitian ini menghasilkan data kuantitatif yang dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi pasir karjon dan penambahan limbah serbuk kayu bangkirai terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik dan Mekanis Aspal Penetrasi 60/70

Penelitian ini menggunakan aspal penetrasi 60/70, yang biasanya disebut dengan aspal Pertamina. Pengujian dilakukan untuk menguji 3 parameter yaitu penetrasi, titik lembek, dan berat jenis aspal, parameter digunakan untuk menunjukkan sifat utama dari aspal yang digunakan dalam campuran perkerasan lentur.

Tabel 3.1 Sifat Fisik dan Mekanis Agregat

No	Jenis Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi		Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Keterangan
			Min	Max			
1	Penetrasi 25°C, 100 g, 5 detik	0,1 mm	60	70	65	SNI 2456:2011	Memenuhi
2	Titik Lembek 5°C (Ring and Ball Test)	°C	48	58	50,5	SNI 2434:2011	Memenuhi
3	Berat Jenis	%	Min. 1,0	-	1.034	SNI 2441:2011	Memenuhi

3.2 Hasil Pengujian dan Perhitungan Kombinasi Agregat

Kombinasi agregat adalah proses penyatuan atau penggabungan material menjadi satu kesatuan yang lebih utuh. Proses ini terdiri dari masing-masing material agregat yang lolos dari saringan 3/4" dan tertahan mulai dari saringan 1/2" sampai dengan saringan No. #200. Dalam kombinasi agregat juga termasuk Hot Bin II, Hot Bin III, Hot Bin IV, Pasir, *Filler* (Semen).

Tabel 3.2 Hasil Penelitian Sifat Fisik dan Mekanis Agregat

No	Jenis Pemeriksaan	Metode	Persyaratan	Hasil	Keterangan
A Agregat kasar					
1 Agregat Kasar Lolos Saringan #200					
a.	Coarse Aggregate 1/2"	SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%	0,64%	Memenuhi
b.	Medium Aggregate 3/4"			0,60%	Memenuhi
2 Penyerapan Air Agregat Kasar					
a.	Coarse Aggregate 1/2"	SNI 1969:2016	Maks. 3%	1,610%	Memenuhi
b.	Medium Aggregate 3/4"			2,090%	Memenuhi
3 Berat Jenis Agregat Kasar (Bulk Specific Gravity)					
a.	Coarse Aggregate 1/2"	SNI 1969:2016	Min. 2,5%	2,620%	Memenuhi
b.	Medium Aggregate 3/4"			2,610%	Memenuhi
B Agregat halus					
1 Agregat Kasar Lolos Saringan #200					
a.	Abu Batu	SNI 03-4142-1996	Maks. 15%	3,45%	Memenuhi
b.	Pasir			12,36%	Memenuhi
2 Penyerapan Air Agregat Kasar					
a.	Abu Batu	SNI 1970:2016	Maks. 3%	2,39%	Memenuhi
b.	Pasir			2,79%	Memenuhi
3 Berat Jenis Agregat Kasar (Bulk Specific Gravity)					
a.	Abu Batu	SNI 1970:2016	Min. 2,5%	2,51%	Memenuhi
b.	Pasir			2,51%	Memenuhi

Tabel 3.3 Perhitungan Kombinasi Agregat

Uraian	Ukuran Saringan (SIEVE SIZE)											
	1"	3/4"	1/2"	3/8"	3/16"	1/4"	1/8"	3/16"	3/32"	1/16"	#200	
mm	25	19	12,5	9,5	4,75	3,75	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075	
Data Material												
Batas Pasir Max 12' (%)	100,00	100,00	47,83	3,33	1,23	0,22	1,14	1,12	0,38	0,48	0,00	
Batas Pasir Max 38' (%)	100,00	100,00	100,00	84,84	19,34	6,80	8,84	8,90	6,54	6,27	2,27	
Abu Batu (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	75,15	49,10	24,20	23,20	10,40	3,30	
Pasir (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	10,40	4,70	
Filler Semen (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,20	
Serbuk Bungkai (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	15,30	85,30	
Total Campuran	70,00	70,00	60,11	49,85	31,87	22,67	18,18	10,84	8,29	5,28	3,19	
Batas Pasir Max 12' (%)	12,00%	12,00	5,75	0,61	0,23	0,03	0,14	0,13	0,07	0,08	0,01	
Batas Pasir Max 38' (%)	40,00%	40,00	40,00	25,94	7,74	2,84	2,78	2,76	2,62	2,51	0,91	
Abu Batu (%)	42,00%	42,00	42,00	42,00	42,00	31,34	20,62	10,18	8,43	4,54	1,39	
Pasir (%)	5,00%	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1,13	0,33	0,14	
Filler Semen (%)	1,00%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	
Serbuk Bungkai (%)	2,00%	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,71	1,91	
Total Campuran	100%	100,00	83,75	74,55	55,86	46,21	29,25	19,06	15,32	8,32	5,24	
Spesifikasi Gradasi												
Max	100	100	95	80	65	48	35	25	18	12	7	
Min	100	100	85	70	50	35	25	12	8	4	3	
Toleransi Komposisi												
max	100,00		85,00	81,00	62,50	43,75	32,00	21,25	16,00	10,70	6,00	
min	85,00		85,00	70,00	52,50	37,50	24,00	15,50	10,00	6,50	4,00	
Luar Perhitungan Agregat	5,31											

Dari Tabel diatas menunjukkan bahwa pengujian analisa kombinasi agregat memiliki prosentase lolos saringan dari No. #200 hingga 1". Hasil pengujian tidak boleh melewati batas atas atau batas bawah sesuai dengan standar yang tersedia. Jika terdapat agregat yang melewati salah satu batas, agregat tersebut tidak diizinkan untuk digunakan sebagai material pengisi pada AC – WC, karena tidak sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

3.3 Pengujian Berat Jenis Campuran Aspal (AASHTO-209s)

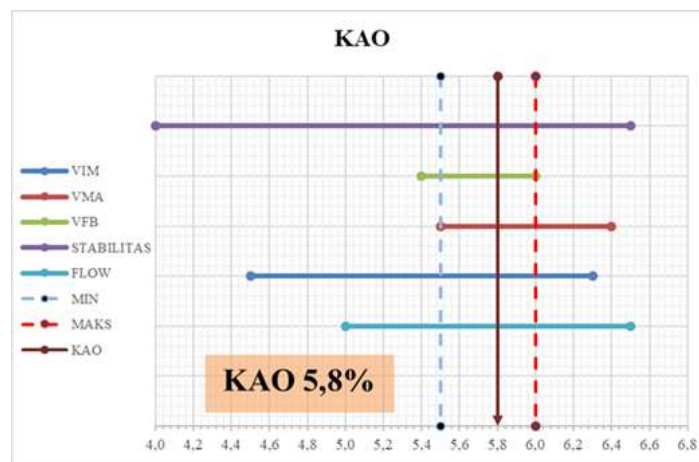
Pengujian berat jenis campuran aspal bertujuan untuk menentukan kepadatan dari campuran aspal. Pengujian ini penting untuk mengevaluasi kualitas dan kesesuaian campuran aspal dengan standar yang sudah ada. Massa dan rasio suatu benda dengan volumenya dikenal sebagai berat jenis, biasanya dinyatakan dengan satuan volume (kg/m³ atau g/m³). Pengujian berat jenis campuran aspal biasa memiliki 5 kadar variasi aspal yakni 4%, 4,5%, 5%, 5,5% dan 6%. Untuk masing – masing kadar variasi ada tiga benda uji GMM.

Tabel 3.3 Berat Jenis Campuran Aspal

No.	Kadar Aspal Normal		Pengujian Berat Jenis Campuran Aspal (GMM)														
	Contoh No :		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Berat Botol = Contoh	Gem	1.421	1.415	1.406	1.398	1.408	1.400	1.389	1.380	1.380	1.413	1.398	1.415	1.409	1.410	1.408
2	Berat Botol	Gem	858	858	858	858	858	858	858	858	858	858	858	858	858	858	858
3	Berat Contoh (1 - 2)	Gem	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
4	Berat Botol = Contoh + Air (batas kalibernasi)	Gem	1.930	1.932	1.930	1.929	1.930	1.928	1.932	1.928	1.928	1.926	1.929	1.929	1.933	1.932	1.930
5	Berat botol + Air (batas kalibernasi)	Gem	1.545	1.546	1.544	1.551	1.554	1.554	1.563	1.570	1.568	1.546	1.558	1.557	1.555	1.560	1.558
6	Berat air (4 - 5)	Gem	385	386	386	378	376	374	369	358	360	380	371	372	378	372	372
7	Volume contoh (3 - 6)	Gem	215	214	214	222	224	226	231	242	240	220	229	228	222	228	228
8	Max Specific Gravity (Gmm) (3 : 7)	Gem/cc	2,791	2,804	2,804	2,703	2,679	2,655	2,597	2,479	2,500	2,727	2,620	2,632	2,703	2,632	2,632
9	Temperatur air T °C	Gem	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
10	Koreksi suhu	Gem	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	Max Specific Gravity (Gmm) (8 x 10)	Gem/cc	2,791	2,804	2,804	2,703	2,679	2,655	2,597	2,479	2,500	2,727	2,620	2,632	2,703	2,632	2,632
Rata - rata GMM Variasi Kadar Aspal %			4,00%			4,50%			5,00%			5,50%			6,00%		

3.4 Hasil Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar Aspal Optimum (KAO) juga merupakan campuran lapisan aspal beton (laston) dan termasuk kadar aspal yang paling efektif. Penelitian dilakukan pada benda uji dengan variasi kadar aspal 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6%, metode penelitian yang sama digunakan untuk menguji berbagai sifat campuran, pengujian tersebut diantaranya bulk density, rongga udara, rongga dalam agregat, rongga terisi aspal, stabilitas marshall, kelelahan, dan marshall quotient. Untuk mendapatkan data sebagaimana dalam grafik berikut ini.



Gambar 3.2 Grafik Kadar Aspal Optimum (KAO)

3.5 Hasil Pemeriksaan Marshall Test

Marshall juga dikenal sebagai metode pengujian yang digunakan untuk menentukan karakteristik campuran aspal, untuk memastikan kualitas dan ketahanan rancangan campuran aspal terhadap beban lalu lintas dan cuaca. Pengujian Marshall bertujuan untuk mendapatkan hasil parameter-parameter berikut : stabilitas, flow, MQ (Marshall Quotient), VMA (Void in Mineral Aggregate), VIM (Void in Mix) dan VFB (Void Filled with Bitumen).

Hasil setelah pemeriksaan Marshall Test berupa rekapitulasi yang tertera pada sebuah tabel dan dalam bentuk grafik dari seluruh nilai parameter yang dapat dilihat pada tabel di bawah. Pengujian telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018. Hasil yang diperoleh dari proses pengujian dibagi dalam 3 komposisi yaitu, komposisi normal, komposisi dengan campuran bahan tambah pasir karjon dan komposisi limbah serbuk kayu bangkirai.

Tabel 3.4 Rekapitulasi Pengujian Marshall Test

Rekapitulasi Rata-Rata Dari 3 Benda Uji Setiap Pengujian Campuran									
Campuran Benda Uji	Kadar pasir Kasar	Kadar Sialok Bangkalir	Rongga udara Agg. (VMA)	Rongga dalam Camp (VVB)	Rongga terisi Aspal (VFB)	Stabilitas	Kelengkapan Plastik (Fbm)	Hasil Bagi Marshall (MBG)	
Spesifikasi :			Min 15 %	3,0 - 5,0 %	Min 65 %	Min 800 kg	2 - 4 mm	-	
MODIFIKASI									
1	P0S0%	0%	21,90	3,77	82,79	821,36	3,10	265,10	
2	P0S1%	0%	24,09	3,92	83,67	827,90	3,27	253,51	
3	P0S3%	0%	22,19	3,62	83,71	831,17	3,33	249,39	
4	P0S5%	0%	23,35	4,32	81,57	831,17	3,23	257,17	
1	P2S0%	2%	22,11	3,66	83,44	847,53	3,00	282,94	
2	P2S1%	2%	20,96	3,92	81,28	926,67	3,10	298,98	
3	P2S3%	2%	22,48	4,11	81,71	855,78	3,07	279,26	
4	P2S5%	2%	22,37	3,85	82,78	958,14	3,13	305,90	
1	P4S0%	4%	21,99	4,04	81,57	1165,47	3,00	368,49	
2	P4S1%	4%	21,17	3,27	84,55	1284,85	3,23	400,01	
3	P4S3%	4%	21,73	3,57	83,61	1011,54	3,00	336,93	
4	P4S5%	4%	22,73	4,29	81,09	1108,93	3,17	349,65	
1	P6S0%	6%	22,20	3,53	84,13	1036,68	3,10	334,48	
2	P6S1%	6%	22,03	4,13	81,15	1029,21	3,33	307,62	
3	P6S3%	6%	22,23	3,55	84,05	935,76	3,37	277,93	
4	P6S5%	6%	22,44	3,93	82,50	1423,14	3,70	382,94	



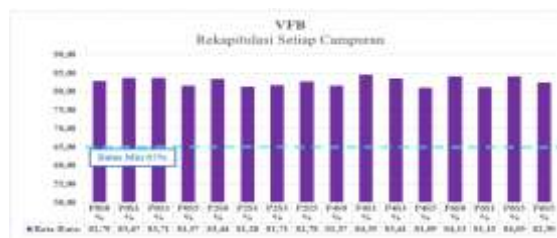
Gambar 3.3 Hasil Rekapitulasi VIM

Nilai VIM (*Voids in Mix*) berada pada rentang spesifikasi, yaitu minimum 3% dan maksimum 5%. Berdasarkan hasil pengujian, semua campuran memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Nilai terendah sebesar 3,27% (P4S1%), sedangkan nilai tertinggi adalah 4,32% (P0S5%).



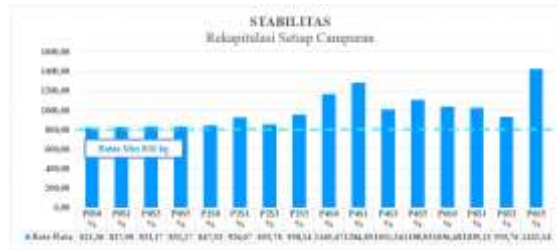
Gambar 3.4 Hasil Rekapitulasi VMA

Nilai VMA (*Voids in Mineral Aggregates*) dari seluruh variasi campuran berada di atas batas minimum 15% yang disyaratkan dalam spesifikasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semua campuran memenuhi persyaratan VMA. Nilai VMA terendah diperoleh pada campuran P2S1% sebesar 20,96%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada campuran P0S1% sebesar 24,09%.



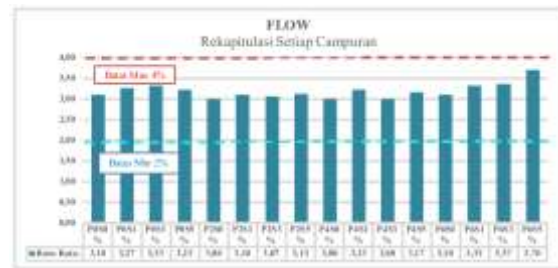
Gambar 3.5 Hasil Rekapitulasi VFB

Nilai VFB (*Void Filled with Bitumen*) dari seluruh variasi campuran berada di atas batas minimum 65% sesuai spesifikasi. Berdasarkan hasil pengujian, semua campuran memenuhi kriteria tersebut. Nilai terendah sebesar 81,09% (P4S5%), sedangkan nilai tertinggi Adalah 84,55% (P4S1%)



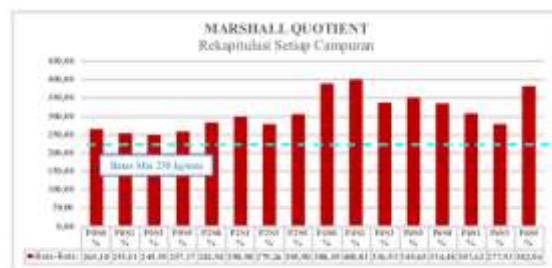
Gambar 3.6 Hasil Rekapitulasi Stabilitas

Nilai stabilitas seluruh variasi campuran berada di atas batas minimum 800 kg sesuai spesifikasi Bina Marga, sehingga dapat disimpulkan bahwa semua campuran memenuhi persyaratan teknis. Nilai stabilitas terendah tercatat sebesar 821,36 kg pada campuran POS0%, sedangkan nilai tertinggi mencapai 1423,14 kg pada campuran P6S5%. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh campuran memiliki kemampuan menahan beban yang baik dan layak digunakan sebagai material perkerasan jalan.



Gambar 3.7 Hasil Rekapitulasi Flow

Nilai Kelelehan (*Flow*) seluruh variasi campuran berada dalam rentang yang dipersyaratkan oleh spesifikasi Bina Marga, yaitu antara 2,00 mm hingga 4,00 mm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh campuran memenuhi persyaratan teknis. Nilai laju aliran terendah tercatat sebesar 3,00 mm pada campuran P2S0%, P4S0%, dan P4S3%, sedangkan nilai tertinggi sebesar 3,70 mm pada campuran P6S5%. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh campuran memiliki karakteristik deformasi yang masih berada dalam batas aman sesuai standar yang ditetapkan.



Gambar 3.8 Hasil Rekapitulasi Marshall Quotient

Hasil *Marshall Quotient* untuk setiap campuran telah memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Dengan nilai terendah sebesar 249,39 kg (P0S3%), sedangkan nilai tertinggi adalah 400,01 kg (P6S5%). Berdasarkan tabel 4 dapat diketahui rekapitulasi nilai rata-rata dari setiap parameter diperoleh hasil yang bervariasi sesuai dengan komposisi.

3.6 Diskusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sifat fisik dan mekanis aspal penetrasi 60/70 yang digunakan berada dalam rentang spesifikasi yang dipersyaratkan, sehingga layak digunakan sebagai bahan pengikat dalam campuran AC-WC. Nilai penetrasi, titik lembek, dan berat jenis yang sesuai standar menunjukkan bahwa aspal memiliki konsistensi dan ketahanan suhu yang memadai untuk mempertahankan stabilitas campuran pada kondisi pelayanan. Kesesuaian sifat aspal ini menjadi dasar penting karena perubahan karakteristik campuran pada tahap berikutnya lebih dipengaruhi oleh variasi agregat dan bahan tambah, bukan oleh kualitas aspal yang digunakan.

Kombinasi agregat yang diperoleh dari hasil analisis saringan menunjukkan gradasi berada dalam batas spesifikasi AC-WC. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur kerangka agregat telah terbentuk dengan baik sehingga mampu mendukung distribusi beban secara efektif. Gradasi yang memenuhi batas atas dan bawah spesifikasi berperan dalam menjaga keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran. Apabila gradasi terlalu kasar, campuran cenderung memiliki rongga yang besar dan stabilitas rendah, sedangkan gradasi terlalu halus dapat menyebabkan kelebihan aspal dan risiko bleeding. Dalam penelitian ini, gradasi yang terkendali memungkinkan evaluasi pengaruh pasir karjon dan limbah serbuk kayu bangkirai dilakukan secara lebih objektif.

Hasil penentuan kadar aspal optimum menunjukkan bahwa campuran normal mampu memenuhi parameter Marshall sebelum dilakukan modifikasi. Penentuan KAO menjadi tahap krusial karena kadar aspal yang terlalu rendah akan menyebabkan campuran rapuh dan mudah retak, sedangkan kadar aspal yang terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas akibat berkurangnya interlocking antar agregat. Dengan diperolehnya KAO yang memenuhi seluruh parameter volumetrik dan mekanis, campuran modifikasi dapat dibandingkan secara konsisten terhadap kondisi optimum tersebut.

Pada pengujian Marshall terhadap campuran modifikasi, seluruh variasi menunjukkan nilai stabilitas di atas batas minimum 800 kg. Hal ini mengindikasikan bahwa substitusi pasir karjon dan penambahan limbah serbuk kayu bangkirai tidak menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban. Bahkan pada beberapa variasi, terjadi peningkatan stabilitas yang cukup signifikan. Peningkatan ini dapat dijelaskan melalui mekanisme pengisian rongga oleh partikel halus serbuk kayu yang memperbaiki kontak antar agregat serta meningkatkan kohesi internal campuran. Selain itu, karakteristik butiran pasir karjon yang berbeda dari agregat halus konvensional dapat mempengaruhi tekstur permukaan dan meningkatkan interlocking mekanis.

Parameter VIM yang berada dalam rentang 3–5% menunjukkan bahwa rongga udara dalam campuran masih berada dalam batas aman. Nilai VIM yang terlalu rendah dapat menyebabkan bleeding, sedangkan nilai yang terlalu tinggi meningkatkan risiko oksidasi dan penetrasi air. Dalam penelitian ini, variasi campuran tetap berada dalam batas spesifikasi, meskipun terjadi fluktuasi kecil antar kombinasi. Variasi tersebut menunjukkan bahwa penambahan limbah serbuk kayu dalam jumlah tertentu berpotensi menyerap sebagian aspal, sehingga mempengaruhi distribusi rongga dalam campuran. Namun demikian, perubahan tersebut masih dalam batas toleransi teknis.

Nilai VMA yang seluruhnya berada di atas batas minimum 15% menunjukkan bahwa ruang antar agregat cukup untuk menampung aspal secara efektif. Hal ini penting untuk menjamin durabilitas campuran dalam jangka panjang. Sementara itu, nilai VFB yang berada di atas 65% mengindikasikan bahwa sebagian besar rongga dalam agregat telah terisi aspal secara optimal. Kombinasi antara VIM, VMA, dan VFB yang memenuhi spesifikasi menunjukkan bahwa modifikasi campuran tidak mengganggu keseimbangan volumetrik yang diperlukan dalam desain AC-WC.

Nilai flow yang berada dalam rentang 2–4 mm menunjukkan bahwa campuran memiliki fleksibilitas yang memadai dan tidak terlalu kaku. Peningkatan stabilitas yang tidak diikuti oleh penurunan flow secara ekstrem menunjukkan bahwa campuran tetap memiliki keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan. Hal ini penting untuk mencegah terjadinya retak akibat beban berulang. Marshall Quotient (MQ) yang memenuhi spesifikasi juga memperlihatkan bahwa rasio antara stabilitas dan flow berada dalam kondisi optimal, sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen.

Meskipun seluruh variasi memenuhi spesifikasi, terdapat perbedaan performa antar kombinasi kadar. Beberapa variasi dengan kadar serbuk kayu lebih tinggi menunjukkan kecenderungan peningkatan stabilitas yang signifikan, namun perlu dicermati potensi perubahan sifat durabilitas jangka panjang yang belum diuji dalam

penelitian ini. Selain itu, variasi dengan kadar substitusi pasir karjon yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan stabilitas yang cukup tajam, yang dapat disebabkan oleh perubahan tekstur dan gradasi efektif campuran.

Secara umum, hasil penelitian ini menjawab tujuan penelitian bahwa kombinasi pasir karjon dan limbah serbuk kayu bangkirai dapat digunakan dalam campuran AC-WC tanpa menurunkan kinerja Marshall, bahkan pada komposisi tertentu mampu meningkatkan stabilitas campuran. Hubungan antara parameter volumetrik dan mekanis menunjukkan bahwa modifikasi material masih berada dalam batas desain yang seimbang. Namun demikian, evaluasi lebih lanjut terhadap ketahanan terhadap air, kelelahan, dan deformasi jangka panjang diperlukan untuk memastikan performa struktural dalam kondisi pelayanan sebenarnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa substitusi pasir karjon dan penambahan limbah serbuk kayu bangkirai berpengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). Seluruh variasi campuran yang diuji masih memenuhi persyaratan teknis parameter Marshall. Komposisi optimum diperoleh pada campuran dengan 2% pasir karjon sebagai substitusi agregat halus dan 5% limbah serbuk kayu bangkirai sebagai bahan tambah. Campuran tersebut menghasilkan nilai VMA sebesar 22,37%, VIM sebesar 3,85%, VFB sebesar 82,78%, stabilitas sebesar 958,14 kg, flow sebesar 3,13 mm, serta Marshall Quotient sebesar 305,90 kg/mm. Nilai stabilitas seluruh variasi campuran berada di atas 800 kg, menunjukkan bahwa modifikasi material tidak menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan pasir karjon sebagai material lokal dan limbah serbuk kayu bangkirai sebagai bahan tambah dapat digunakan sebagai alternatif dalam campuran AC-WC tanpa mengurangi kinerja teknisnya. Secara praktis, temuan ini berpotensi mendukung penggunaan material lokal dan limbah industri dalam konstruksi perkerasan jalan, sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap agregat konvensional dan meningkatkan nilai guna limbah. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji ketahanan jangka panjang campuran terhadap pengaruh air, kelelahan (fatigue), dan deformasi permanen guna memastikan kinerja struktural dalam kondisi lalu lintas dan lingkungan yang lebih bervariasi.

Referensi

1. Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-4142-1996: Metode pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm)*. Badan Standardisasi Nasional.
2. Badan Standardisasi Nasional. (2011a). *SNI 2434:2011: Cara uji titik lembek aspal dengan alat cincin dan bola (Ring and Ball)*. Badan Standardisasi Nasional.
3. Badan Standardisasi Nasional. (2011b). *SNI 2441:2011: Cara uji berat jenis aspal keras*. Badan Standardisasi Nasional.
4. Badan Standardisasi Nasional. (2011c). *SNI 2456:2011: Cara uji penetrasi aspal*. Badan Standardisasi Nasional.
5. Badan Standardisasi Nasional. (2012a). *SNI ASTM C117:2012: Metode uji bahan yang lebih halus dari saringan 75 μ m (No. 200) dalam agregat mineral dengan pencucian*. Badan Standardisasi Nasional.
6. Badan Standardisasi Nasional. (2012b). *SNI ASTM C136:2012: Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
7. Badan Standardisasi Nasional. (2016a). *SNI 1969:2016: Metode uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
8. Badan Standardisasi Nasional. (2016b). *SNI 1970:2016: Metode uji berat jenis dan penyerapan agregat halus*. Badan Standardisasi Nasional.
9. Direktorat Jenderal Bina Marga. (2003). *RSNI M-01-2003: Metode pengujian campuran beraspal panas dengan alat Marshall*. Direktorat Jenderal Bina Marga.
10. Direktorat Jenderal Bina Marga. (2010). *Spesifikasi umum 2010 (Revisi 3)*. Direktorat Jenderal Bina Marga.
11. Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi umum Bina Marga 2018 (Revisi 2) untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
12. Faltoni, A., & Afandi, N. (2021). Pengaruh penggunaan aspal Buton B5/20 dengan agregat lokal Madura pada campuran aspal panas AC-WC terhadap karakteristik Marshall. *Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.53712/rjrs.v6i1.1157>
13. Fithra, H. (2017). Pengaruh jumlah tumbukan pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) tambahan lateks terhadap sifat Marshall. *Teras Jurnal*, 7(1), 203–212.
14. Hermaldi, M., & Sjahdanulirwan, M. (2008). Usulan spesifikasi campuran beraspal panas Asbuton Lawele untuk perkerasan jalan. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 25(3), 327–349.
15. Hakim, A. L. N., & Widayanti, A. (2025). Karakteristik abu serbuk kayu jati dan material agregat alam. *Jurnal Mitrans*.
16. Kefie, P. T., Suryadharna, A., Santoso, I., & Proboyo, B. (2011). Perancangan perkerasan concrete block dan estimasi biaya. *Patrisius*, 1–8.
17. Mallisch, W. R. (1988). Roller compacted concrete pavements. *Concrete Construction - World of Concrete*, 33(1).
18. Nugraha, D. C., & Agustapraja, H. R. (2024). Pengaruh sekam padi dan serbuk kayu sebagai substitusi filler pada campuran Laston AC-WC. *Jurnal Talenta Sipil*, 7(1), 42–64.
19. Perdana, R. F., & Supriyanto, B. (2022). Utilization of rice husk waste and wood powder as filler in AC-WC asphalt. *JACEE, Universitas Islam Sultan Agung*.
20. Pratama, F. D. (2021). Pengaruh penggunaan substitusi filler serbuk kayu dalam campuran aspal beton. *Jurnal Teknik Sipil Unaya*.
21. Purwanto, H. (2024). Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap karakteristik campuran aspal beton. *Jurnal CEBT*.

22. Rahman, I. N., Damara, D. S., & Nurdiana, A. (2024). Pemanfaatan limbah serbuk kayu dengan zat aditif anti-stripping agent terhadap durabilitas AC-WC. *PILARS UNDIP*, 2(3), 1–7.
23. Sims, I. (2016). The Shell bitumen handbook. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 169(1). <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00061>
24. Yunus, A. I. (2024). Tinjauan nilai parameter Marshall dan kehilangan berat campuran AC-WC menggunakan abu sekam padi. *Jurnal Tekstur*, 2(1), 21–35