



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 2 Desember 2025, Hal. 410-422
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptaintelektual.com/scripta-technica>

Analisis Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) Modifikasi Dengan Penambahan Wood Ash Dan Styrofoam Expanded Polystyrene (EPS) Untuk Perkerasan Jalan

Pradita Setya Ningtyias^{1*}, Siti Fatimah², Rachmat Mudiyono³

¹⁻³ Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

email: pradhitadhita98@gmail.com¹, sfatiimaha02@gmail.com²

Article Info :

Received:

28-11-2025

Revised:

26-12-2025

Accepted:

31-12-2025

Abstract

This laboratory-based quantitative experimental study evaluated the performance of Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) modified with wood ash as filler and Expanded Polystyrene (EPS) styrofoam as asphalt additive. The research verified the base binder through penetration testing, yielding an average penetration value of 69.4, confirming the use of 60/70 penetration grade asphalt. Asphalt content was validated using extraction testing, resulting in an average binder content of 5.80%, ensuring consistency between design and actual mixture composition. Marshall testing was conducted to assess mechanical and volumetric characteristics, including stability, flow, Marshall Quotient (MQ), VMA, VIM, and VFB. The results demonstrated that EPS dosage significantly influenced volumetric balance and load resistance within the mixture. Among the evaluated combinations using 4% wood ash and EPS levels of 0%, 0.5%, 1%, and 1.5%, the optimum performance was achieved at 1.5% EPS, which satisfied key Bina Marga 2018 Revision 2 requirements for VIM, VMA, VFB, stability, and flow. However, MQ values remained below specification for all mixtures, indicating limitations in stiffness-deformation ratio and the need for further optimization and durability testing.

Keywords: AC-WC, Wood Ash, EPS Styrofoam, Marshall Test, Asphalt Modification.

Abstrak

Studi eksperimental kuantitatif berbasis laboratorium ini mengevaluasi kinerja Lapisan Pengikis Beton Aspal (AC-WC) yang dimodifikasi dengan abu kayu sebagai pengisi dan styrofoam polistiren ekspansi (EPS) sebagai aditif aspal. Penelitian ini memverifikasi pengikat dasar melalui uji penetrasi, menghasilkan nilai penetrasi rata-rata 69,4, yang mengonfirmasi penggunaan aspal dengan grade penetrasi 60/70. Kandungan aspal diverifikasi melalui uji ekstraksi, menghasilkan kandungan pengikat rata-rata 5,80%, memastikan konsistensi antara desain dan komposisi campuran aktual. Uji Marshall dilakukan untuk menilai karakteristik mekanis dan volumetrik, termasuk stabilitas, aliran, Marshall Quotient (MQ), VMA, VIM, dan VFB. Hasil menunjukkan bahwa dosis EPS secara signifikan mempengaruhi keseimbangan volumetrik dan resistansi beban dalam campuran. Di antara kombinasi yang dievaluasi menggunakan 4% abu kayu dan tingkat EPS 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%, kinerja optimal dicapai pada 1,5% EPS, yang memenuhi persyaratan utama Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk VIM, VMA, VFB, stabilitas, dan aliran. Namun, nilai MQ tetap di bawah spesifikasi untuk semua campuran, menunjukkan keterbatasan dalam rasio kekakuan-deformasi dan kebutuhan akan optimasi lebih lanjut serta pengujian ketahanan.

Kata kunci: AC-WC, Abu Kayu, EPS Styrofoam, Uji Marshall, Modifikasi Aspal.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan mutakhir teknologi perkerasan jalan pada dekade terakhir bergerak menuju dua orientasi yang saling menekan namun harus dipertemukan, yakni tuntutan peningkatan kinerja struktural lapis aus di bawah beban lalu lintas yang semakin agresif dan dorongan global untuk menurunkan jejak lingkungan material konstruksi melalui substitusi limbah bernilai rendah menjadi komponen fungsional campuran beraspal (Ichsan et al., 2023; Aszharri et al., 2024). Pada level internasional, AC-WC diposisikan sebagai lapisan kritis yang paling cepat menerima degradasi akibat kombinasi tegangan geser, siklus termal, dan kelembapan, sehingga inovasi material pada lapisan ini memiliki leverage teknis paling besar terhadap umur layanan perkerasan (Bela, 2024; Gomies et al., 2024). Dalam konteks negara berkembang dengan intensitas kendaraan meningkat, problem premature distress bukan sekadar isu teknis, melainkan juga persoalan efisiensi fiskal dan kontinuitas layanan

ekonomi, karena biaya pemeliharaan meningkat ketika lapisan aus gagal sebelum horizon desain (Assiddiqie et al., 2024). Literatur juga menunjukkan bahwa kebijakan substitusi material lokal dan penggunaan aditif berbasis limbah telah menjadi arah penelitian yang dominan, bukan hanya karena faktor biaya, tetapi karena keterkaitan langsungnya dengan agenda circular economy di sektor konstruksi jalan (Kurnia et al., 2023; Kurnia et al., 2024). Dengan kerangka tersebut, studi mengenai kombinasi filler alternatif dan modifikasi binder menggunakan limbah polimer menjadi relevan sebagai strategi ganda: meningkatkan parameter Marshall sekaligus mereduksi beban lingkungan dari residu industri dan domestik (Delani & Patriotika, 2025; Afra et al., 2025).

Penelitian terdahulu telah mengonfirmasi bahwa substitusi material berbasis polimer, khususnya plastik jenis tertentu, dapat meningkatkan stabilitas, memperbaiki Marshall Quotient, serta memodifikasi perilaku deformasi campuran AC-WC melalui mekanisme peningkatan kohesi dan perubahan viskoelastisitas binder, meskipun efeknya sangat bergantung pada jenis plastik, bentuk, dan proporsi pencampuran (Ichsan et al., 2023; Delani & Patriotika, 2025). Pada sisi lain, studi yang mengevaluasi styrofoam/EPS sebagai substitusi atau modifikasi menunjukkan kecenderungan peningkatan fleksibilitas campuran dan potensi ketahanan terhadap retak, namun pada beberapa kondisi juga menimbulkan risiko penurunan densitas dan perubahan VIM yang dapat memengaruhi durabilitas jangka panjang (Afra et al., 2025; Delani & Patriotika, 2025). Kajian terkait filler berbasis abu kayu menunjukkan bahwa kandungan mineral tertentu pada wood ash dapat berfungsi sebagai filler aktif yang meningkatkan interlocking mikro dan menambah kekakuan matriks mastic, sehingga parameter stabilitas dapat meningkat ketika gradasi dan kadar filler berada pada rentang optimum (Kurnia et al., 2023; Kurnia et al., 2024). Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa pendekatan modifikasi campuran tidak lagi dapat dipahami sebagai “penambahan bahan” semata, melainkan sebagai rekayasa sistem material multi-fase yang mengubah hubungan antara binder-filler-agregat dalam skala mikro dan makro (Bela, 2024; Aszharri et al., 2024). Dalam studi berbasis lapangan, faktor pelaksanaan seperti jarak penghamparan dan perubahan suhu campuran juga terbukti memengaruhi performa AC-WC, sehingga hasil laboratorium perlu dibaca secara kritis dengan mempertimbangkan sensitivitas proses produksi dan konstruksi (Gomies et al., 2024). Bahkan pada pendekatan yang memanfaatkan material lokal seperti Asbuton, literatur memperlihatkan bahwa performa AC-WC sangat ditentukan oleh kompatibilitas material dan konsistensi parameter volumetrik terhadap spesifikasi, yang memperkuat argumen bahwa inovasi material harus disertai kontrol desain campuran yang ketat (Assiddiqie et al., 2024).

Walaupun berbagai studi telah menunjukkan manfaat parsial dari limbah polimer maupun filler alternatif, literatur masih memperlihatkan keterbatasan konseptual dan empiris yang cukup tajam, terutama karena sebagian besar penelitian menguji satu jenis modifikasi secara terpisah sehingga interaksi antar-modifier dalam satu sistem campuran belum terpetakan secara sistematis (Kurnia et al., 2023; Delani & Patriotika, 2025). Pada penelitian EPS, fokus yang dominan masih berkisar pada performa Marshall atau respons terhadap kondisi tertentu, misalnya perendaman media agresif, sementara implikasinya terhadap parameter volumetrik dan stabilitas desain campuran dalam konteks spesifikasi nasional sering kali tidak dianalisis secara komprehensif (Afra et al., 2025; Delani & Patriotika, 2025). Studi wood ash juga cenderung berhenti pada level pembuktian bahwa filler dapat bekerja, namun belum banyak yang menguji bagaimana wood ash berperan ketika binder dimodifikasi polimer ringan seperti EPS yang memiliki karakteristik termal dan mekanika berbeda dibanding plastik padat seperti HDPE (Kurnia et al., 2024; Ichsan et al., 2023). Inkonsistensi lain muncul pada aspek durabilitas, karena peningkatan stabilitas yang dilaporkan beberapa penelitian dapat beriringan dengan perubahan VIM/VMA yang berpotensi mempercepat penetrasi air, sehingga klaim “lebih tahan lama” sering tidak sepenuhnya ditopang oleh analisis hubungan sebab-akibat antarparameter (Bela, 2024; Afra et al., 2025). Keterbatasan berikutnya terletak pada kurangnya sintesis antara faktor material dan faktor pelaksanaan, padahal studi temperatur dan proses penghamparan menunjukkan bahwa perubahan kecil pada kondisi termal dapat menggeser performa campuran secara signifikan, terutama pada campuran yang sudah dimodifikasi (Gomies et al., 2024). Literatur mengenai perkerasan porus dan pemodelan kinerja juga mengindikasikan bahwa pendekatan evaluasi seharusnya tidak hanya berhenti pada indikator mekanis dasar, tetapi perlu dibaca sebagai sistem kinerja yang dipengaruhi desain, material, dan proses konstruksi, yang sampai saat ini belum menjadi kebiasaan pada studi-studi modifikasi sederhana (Aszharri et al., 2024; Fadly, 2025).

Celah tersebut memunculkan urgensi ilmiah yang tidak kecil, karena campuran AC-WC merupakan lapisan yang paling cepat mengalami distress dan menjadi titik awal kerusakan struktural yang merambat ke lapisan bawah ketika retak dan deformasi tidak ditangani sejak fase desain material (Bela, 2024; Aszharri et al., 2024). Pada level praktis, ketidakmampuan mengoptimalkan campuran modifikasi berarti biaya pemeliharaan tetap tinggi, sementara limbah styrofoam dan residu abu kayu terus menjadi beban lingkungan yang tidak terserap ke dalam rantai nilai konstruksi secara produktif (Afra et al., 2025; Kurnia et al., 2023). Lebih jauh, temuan bahwa EPS dapat memengaruhi densitas dan potensi durabilitas menunjukkan bahwa pendekatan substansi limbah tidak dapat diperlakukan sebagai solusi “hijau” yang otomatis lebih baik, karena keberlanjutan material hanya sahif jika kinerja struktural dan umur layanan tidak terdegradasi (Delani & Patriotika, 2025; Afra et al., 2025). Di sisi lain, wood ash memiliki potensi sebagai filler aktif, namun jika tidak dipadukan secara tepat dengan binder yang dimodifikasi, peningkatan kekakuan dapat memperbesar risiko retak termal atau retak lelah pada kondisi tertentu, sehingga diperlukan pembuktian desain yang lebih ketat dan berbasis parameter spesifikasi (Kurnia et al., 2024; Assiddiqie et al., 2024). Kebutuhan untuk menyeimbangkan fleksibilitas dan kekakuan menjadi semakin penting ketika lalu lintas berat dan iklim tropis lembap mempercepat siklus kerusakan, yang menuntut campuran tidak hanya kuat pada uji awal tetapi juga stabil secara volumetrik (Gomies et al., 2024; Bela, 2024). Literatur yang mengevaluasi plastik seperti HDPE juga memperlihatkan bahwa karakteristik polimer memengaruhi performa secara spesifik, sehingga hasil dari satu jenis plastik tidak dapat diekstrapolasi langsung ke EPS tanpa pengujian empiris yang memadai (Ichsan et al., 2023; Afra et al., 2025). Karena itu, pertanyaan ilmiah yang belum terjawab bukan sekadar “apakah limbah dapat digunakan”, melainkan “bagaimana interaksi dua limbah dengan fungsi berbeda dapat menghasilkan konfigurasi campuran yang memenuhi spesifikasi dan stabil dalam parameter kinerja utama”.

Dalam lanskap keilmuan tersebut, penelitian ini diposisikan sebagai upaya menguji campuran AC-WC dengan pendekatan dual-modifier yang secara fungsional saling melengkapi, yakni wood ash sebagai filler yang berpotensi meningkatkan kekakuan mastic dan EPS sebagai modifikasi yang berpotensi meningkatkan fleksibilitas serta mengubah karakter viskoelastis binder (Kurnia et al., 2023; Afra et al., 2025). Posisi ini berbeda dari sebagian besar penelitian sebelumnya yang cenderung memisahkan domain filler dan domain polimer, sehingga belum ada pemetaan yang jelas mengenai kompromi desain antara stabilitas, flow, dan parameter volumetrik ketika kedua bahan diterapkan bersamaan (Delani & Patriotika, 2025; Kurnia et al., 2024). Relevansi ilmiah penelitian juga terletak pada pembacaan campuran sebagai sistem yang harus memenuhi standar, karena studi Asbuton menegaskan bahwa inovasi material akan kehilangan nilai aplikatif jika tidak dapat dibuktikan kompatibel dengan spesifikasi teknis dan kontrol kualitas yang berlaku (Assiddiqie et al., 2024). Dalam perspektif kinerja, penelitian tentang pengaruh suhu dan proses penghamparan memberi sinyal bahwa modifikasi material harus dinilai bukan hanya pada nilai Marshall, tetapi pada stabilitas parameter yang menjadi prasyarat performa lapangan (Gomies et al., 2024). Kajian durabilitas AC-WC berbasis agregat tertentu juga mengingatkan bahwa perubahan pada filler dan binder dapat menggeser karakter campuran secara signifikan, sehingga desain campuran yang kuat harus dibangun melalui evaluasi parameter yang saling terkait, bukan indikator tunggal (Bela, 2024). Bahkan literatur perkerasan porus menekankan pentingnya pemahaman mekanisme deformasi dan respons struktur perkerasan terhadap beban, yang memperkuat kebutuhan penelitian campuran modifikasi untuk menghasilkan basis desain yang lebih dapat dipertanggungjawabkan secara mekanistik (Aszharri et al., 2024; Fadly, 2025). Dengan demikian, penelitian ini berada pada irisan antara inovasi material berbasis limbah, pemenuhan spesifikasi, dan kebutuhan rekayasa perkerasan yang lebih tahan terhadap beban serta iklim.

Penelitian ini bertujuan menganalisis hasil Job Mix Design yang memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dengan variasi penambahan wood ash dan styrofoam Expanded Polystyrene (EPS), serta mengevaluasi secara komprehensif perubahan stabilitas, flow, Marshall Quotient, VIM, VMA, dan VFB sebagai indikator utama performa campuran. Kontribusi teoretis penelitian diarahkan pada pemodelan argumentatif mengenai bagaimana interaksi filler mineral berbasis residu biomassa dan modifikasi polimer ringan memengaruhi keseimbangan kekakuan–fleksibilitas pada lapis aus, sehingga hubungan antarparameter Marshall dan volumetrik dapat dibaca sebagai mekanisme material yang konsisten. Kontribusi metodologis penelitian diletakkan pada desain pengujian yang menempatkan parameter spesifikasi sebagai kerangka evaluasi utama, sehingga hasil tidak berhenti pada klaim peningkatan kinerja, tetapi

menunjukkan konfigurasi campuran yang valid secara teknis untuk implementasi. Kontribusi praktisnya berupa alternatif pemanfaatan limbah lokal yang lebih terukur untuk peningkatan performa lapis aus pada kondisi iklim tropis dan lalu lintas berat, sekaligus memperluas opsi material ramah lingkungan yang tetap memenuhi persyaratan mutu. Seluruh rangkaian tujuan dan kontribusi tersebut diharapkan menghasilkan basis keputusan desain campuran yang lebih presisi bagi pengembangan perkerasan jalan yang berkelanjutan, ekonomis, dan berumur layanan lebih panjang.

METODE PENELITIAN

Studi ini merupakan eksperimen empiris kuantitatif berbasis laboratorium yang dirancang untuk mengevaluasi perubahan kinerja campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) akibat penambahan wood ash sebagai filler dan Styrofoam Expanded Polystyrene (EPS) sebagai bahan tambah pada aspal. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Perkerasan Jalan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang ($6^{\circ}57'11"S$ $110^{\circ}27'33"E$) dengan arsitektur sistem berupa rangkaian produksi benda uji Hot Mix Asphalt yang dikontrol ketat pada variabel material dan proses. Bahan utama yang digunakan meliputi agregat sesuai gradasi AC-WC, aspal penetrasi 60/70, wood ash yang diproses sebagai filler substitusi, serta EPS yang dipersiapkan sebagai aditif polimer untuk memodifikasi karakter mastic. Variabel bebas ditetapkan pada empat level kadar wood ash (0%, 2%, 4%, 6%) dan empat level kadar EPS (0%, 0,5%, 1%, 1,5%), sehingga terbentuk matriks kombinasi campuran yang memungkinkan identifikasi efek tunggal maupun efek interaksi kedua bahan tambah. Benda uji dibuat menggunakan cetakan standar diameter 10 cm, metode pemanatan Marshall hammer, dan prosedur curing 24 jam pada suhu ruang untuk memastikan kondisi awal campuran seragam sebelum pengujian. Tahap implementasi meliputi penimbangan material, pemanasan agregat dan aspal pada temperatur pencampuran, pencampuran wood ash pada fraksi filler, penambahan EPS pada fase binder, pembentukan benda uji pada mold, pemanatan sesuai jumlah tumbukan standar, serta pelabelan spesimen secara sistematis agar replikasi dan pelacakan data dapat dilakukan secara presisi.

Prosedur pengujian dilakukan melalui uji Marshall sebagai instrumen utama untuk menilai karakteristik mekanik dan volumetrik campuran, dengan parameter keluaran berupa stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), density, VIM, VMA, dan VFB sebagai variabel terikat. Setiap variasi campuran diuji pada kondisi standar Marshall sehingga hasil numerik dapat dibandingkan secara langsung antarperlakuan dan terhadap persyaratan spesifikasi yang berlaku, terutama acuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 sebagai kerangka validasi teknis. Validasi dilakukan dengan dua lapisan, yaitu validasi kesesuaian spesifikasi (compliance-based validation) untuk menentukan apakah setiap komposisi memenuhi batas minimum dan rentang parameter yang dipersyaratkan, serta validasi statistik untuk memastikan bahwa perbedaan kinerja antarvariasi bukan sekadar fluktuasi pengujian. Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan komparatif untuk memetakan pola respons stabilitas, deformasi, dan karakter volumetrik terhadap kenaikan kadar wood ash maupun EPS. Metrik evaluasi kinerja ditetapkan sebagai kombinasi indikator ketahanan beban (stabilitas dan MQ), indikator deformasi plastis (flow), serta indikator kualitas struktur internal campuran (density, VIM, VMA, VFB) karena parameter-parameter tersebut secara bersama menentukan keseimbangan antara kekakuan, fleksibilitas, dan durabilitas lapis aus. Reproduksibilitas dijaga melalui kontrol variabel proses (jenis aspal, metode hot mix, ukuran benda uji, metode pemanatan, dan curing), dokumentasi temperatur pencampuran dan pemanatan, serta pencatatan sistematis seluruh hasil uji sehingga seluruh rangkaian eksperimen dapat diulang pada laboratorium lain dengan kondisi ekuivalen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Penetrasi Aspal dan Implikasi Klasifikasi Binder untuk Campuran AC-WC

Karakteristik awal binder merupakan prasyarat fundamental dalam studi campuran beraspal panas, karena seluruh respons mekanik dan volumetrik AC-WC pada uji Marshall sangat ditentukan oleh kekakuan relatif aspal yang direpresentasikan melalui nilai penetrasi. Pengujian penetrasi pada penelitian ini dilakukan dalam dua kali percobaan, masing-masing pada lima titik pengukuran (tengah, atas, bawah, kanan, kiri), sehingga variabilitas lokal material dapat dibaca sebagai indikator homogenitas sampel dan konsistensi prosedur pengujian. Pada percobaan pertama, rentang nilai penetrasi berada pada 58–84 dmm, sedangkan percobaan kedua berada pada 64–74 dmm, yang memperlihatkan bahwa fluktuasi terbesar terjadi pada percobaan pertama ketika titik bawah

menunjukkan nilai paling rendah. Pola ini relevan secara teknis karena perbedaan penetrasi antar titik sering mengindikasikan ketidakseragaman temperatur, ketidakteraturan permukaan sampel, atau perbedaan kondisi pendinginan sebelum pengujian, yang secara empiris diketahui dapat memengaruhi hasil penetrasi secara signifikan (Gomies et al., 2024). Ketika pengujian penetrasi diposisikan sebagai tahap kontrol mutu awal, data ini berfungsi sebagai baseline untuk memastikan bahwa seluruh evaluasi Marshall pada campuran wood ash dan EPS berada dalam kerangka binder yang identik, sehingga interpretasi efek bahan tambah tidak bias oleh perbedaan jenis aspal (Assiddiqie et al., 2024).

Tabel 1. Hasil Percobaan Pertama Uji Penetrasi Aspal

No	Posisi	X ₀	X _t	X _t – X ₀
1	Tengah	0	84	84
2	Atas	0	70	70
3	Bawah	0	58	58
4	Kanan	0	80	80
5	Kiri	0	62	62
Rata-rata				70,8

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Nilai rata-rata penetrasi pada percobaan pertama sebesar 70,8 dmm memperlihatkan kecenderungan binder berada di batas atas kelas 60/70, namun masih dalam rentang yang secara umum diterima untuk AC-WC di Indonesia. Secara konseptual, binder dengan penetrasi lebih tinggi cenderung lebih lunak, sehingga memberikan fleksibilitas lebih besar pada campuran tetapi berpotensi meningkatkan deformasi permanen ketika beban lalu lintas berulang terjadi pada suhu tinggi. Konsekuensi ini penting karena penelitian modifikasi AC-WC dengan bahan polimer seperti EPS sering menargetkan peningkatan stabilitas dan resistensi deformasi melalui mekanisme penguatan mastic, sehingga karakter awal binder harus dipahami sebelum menilai efek EPS (Yuniarti et al., 2022). Pada penelitian berbasis limbah styrofoam, peningkatan performa Marshall sering dilaporkan pada kadar tertentu karena EPS meningkatkan viskositas efektif binder dan memperkuat ikatan antar agregat, meskipun efeknya sangat bergantung pada kelas penetrasi awal (Tisnawan et al., 2025). Dengan demikian, penetrasi awal yang mendekati batas atas kelas 60/70 memberikan ruang teoretis bagi EPS untuk berperan sebagai penyeimbang kekakuan, bukan sebagai penyebab campuran menjadi terlalu kaku.

Tabel 2. Hasil Percobaan Kedua Uji Penetrasi Aspal

No	Posisi	X ₀	X _t	X _t – X ₀
1	Tengah	0	70	70
2	Atas	0	65	65
3	Bawah	0	64	64
4	Kanan	0	74	74
5	Kiri	0	64	67
Rata-rata				68

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Percobaan kedua menunjukkan rata-rata 68 dmm yang lebih rendah dan lebih stabil dibanding percobaan pertama, karena rentang nilai lebih sempit dan tidak ada outlier ekstrem seperti nilai 84 dmm pada titik tengah percobaan pertama. Stabilitas ini memperkuat reliabilitas bahwa binder yang digunakan memang berada dalam kelas 60/70, bukan hasil artefak pengujian, sehingga validitas internal penelitian meningkat pada tahap awal. Ketika kedua percobaan digabungkan, nilai rata-rata total sebesar 69,4 dmm menempatkan aspal secara tegas pada kategori AC pen 60/70, yang merupakan binder standar untuk campuran AC-WC dan banyak digunakan pada penelitian modifikasi berbasis aditif maupun filler limbah. Penetapan kelas ini krusial karena berbagai penelitian menunjukkan bahwa respons Marshall pada campuran AC-WC sangat sensitif terhadap kekakuan binder, sehingga studi yang tidak mengontrol kelas penetrasi sering menghasilkan inkonsistensi antar temuan meskipun bahan tambah serupa

digunakan (Samudro & Rahardjo, 2024). Dalam konteks penelitian ini, penetrasi 69,4 dmm dapat dipandang sebagai kondisi binder yang cukup moderat untuk mengevaluasi efek wood ash sebagai filler reaktif dan EPS sebagai modifikasi binder, sehingga interpretasi kinerja campuran pada tahap Marshall tidak terdistorsi oleh binder yang terlalu keras atau terlalu lunak (Kurnia et al., 2023).

Konsistensi penetrasi pada kisaran 60/70 juga memiliki implikasi langsung terhadap argumentasi ilmiah bahwa perubahan parameter Marshall pada campuran wood ash dan EPS benar-benar merefleksikan efek modifikasi material, bukan akibat variasi sifat dasar binder. Dalam literatur, filler berbasis abu seperti wood ash atau abu arang kayu memiliki kecenderungan meningkatkan kekakuan mastic melalui peningkatan fraksi mineral halus, pengisian rongga mikro, serta kemungkinan kontribusi kimia dari kandungan silika dan oksida yang memodifikasi adhesi aspal-agregat (Pratama & Hadi, 2024). Ketika filler meningkatkan kekakuan, EPS berpotensi memainkan peran berbeda, yaitu menambah elastisitas dan ketahanan deformasi, sehingga kombinasi keduanya sering menghasilkan trade-off antara stabilitas dan flow yang tidak selalu linier (Lebang et al., 2024). Penelitian-penelitian yang membandingkan filler alternatif seperti silica fume dan abu batu marmer menunjukkan bahwa karakter awal binder menentukan seberapa jauh filler dapat meningkatkan stabilitas tanpa mengorbankan workability, sehingga penetrasi yang terukur menjadi parameter kunci dalam desain campuran (Lubis et al., 2024; Kurniawan et al., 2024). Dengan baseline penetrasi yang terkласifikasi jelas, penelitian ini memenuhi prasyarat metodologis untuk melanjutkan ke evaluasi ekstraksi kadar aspal dan pengujian Marshall sebagai inti penilaian performa AC-WC modifikasi.

Secara kritis, variasi antar titik pengukuran yang masih muncul pada percobaan pertama menunjukkan bahwa kontrol kondisi uji penetrasi perlu diperlakukan sebagai sumber ketidakpastian eksperimental, terutama pada penelitian yang mengandalkan perbedaan angka Marshall antar variasi kadar bahan tambah yang relatif kecil. Literatur tentang campuran beraspal menegaskan bahwa perbedaan kecil dalam temperatur pencampuran, temperatur uji, atau kondisi penyimpanan dapat memengaruhi hasil karakteristik binder dan campuran, yang pada gilirannya memengaruhi stabilitas, VIM, dan flow (Gomies et al., 2024). Dalam penelitian modifikasi berbasis polimer, efek EPS sering terlihat lebih kuat ketika binder awal cenderung lebih lunak, karena EPS meningkatkan viskositas dan memperkuat struktur binder, sedangkan pada binder yang sudah kaku efeknya bisa berubah menjadi peningkatan kerapuhan (Afra et al., 2025). Temuan penetrasi 69,4 dmm menempatkan binder pada posisi yang secara teoritis memungkinkan EPS meningkatkan stabilitas tanpa memicu penurunan flow secara ekstrem, meskipun validitas hipotesis tersebut harus diuji melalui data Marshall. Kerangka ini konsisten dengan penelitian terdahulu yang menekankan bahwa pengujian penetrasi bukan sekadar formalitas, melainkan bagian dari kontrol kualitas yang menentukan interpretasi mekanistik pada hasil Marshall (Putra et al., 2023).

Dari perspektif kontribusi penelitian, hasil penetrasi yang terkласifikasi AC pen 60/70 menjadi titik awal yang memperjelas bahwa studi ini tidak menggunakan binder spesifik seperti asbuton atau resin tertentu, sehingga pembacaan efek wood ash dan EPS dapat dibandingkan secara lebih luas dengan studi AC-WC modifikasi yang memakai aspal konvensional penetrasi 60/70. Hal ini penting karena penelitian berbasis binder alternatif seperti asbuton atau resin memiliki karakteristik awal berbeda, sehingga sulit dijadikan banding langsung untuk studi EPS dan wood ash (Assiddiqie et al., 2024; Samudro & Rahardjo, 2024). Dengan binder standar, penelitian ini secara metodologis lebih dekat dengan studi substitusi plastik seperti HDPE atau styrofoam yang mengevaluasi dampak aditif terhadap parameter Marshall, sehingga diskusi lintas penelitian menjadi lebih sah (Ichsan et al., 2023; Delani & Patriotika, 2025). Penetapan kelas penetrasi juga membantu mengikat pembahasan pada dimensi praktis, karena spesifikasi lapangan umumnya mengasumsikan binder 60/70 untuk AC-WC, sehingga hasil penelitian ini berpotensi lebih mudah diadopsi dalam konteks pekerjaan jalan. Dengan dasar ini, tahap berikutnya yang menguji kadar aspal aktual melalui ekstraksi dan respons Marshall campuran dapat dibahas sebagai konsekuensi logis dari kontrol mutu binder yang telah terverifikasi.

Evaluasi Kadar Aspal Aktual Melalui Uji Ekstraksi dan Implikasi terhadap Kinerja Campuran AC-WC

Pengujian ekstraksi pada penelitian ini berfungsi sebagai tahap verifikasi kuantitatif terhadap kadar aspal efektif dalam campuran AC-WC, karena kadar binder aktual yang melekat pada agregat akan menentukan karakter volumetrik dan stabilitas yang diperoleh pada uji Marshall. Secara metodologis, uji ekstraksi juga menjadi mekanisme kontrol kualitas yang memastikan bahwa perbedaan

performa antar variasi campuran wood ash dan EPS tidak berasal dari deviasi kadar aspal akibat ketidaktepatan penimbangan, segregasi, atau kehilangan binder selama proses pencampuran dan pemadatan. Data ekstraksi menunjukkan bahwa massa aspal dalam campuran dihitung melalui selisih berat campuran sebelum ekstraksi (D) terhadap berat total mineral setelah ekstraksi (G), sehingga kadar aspal diperoleh secara langsung dan dapat direproduksi. Pada konteks perkerasan lentur, validasi kadar aspal menjadi krusial karena perubahan kecil pada kadar binder dapat menyebabkan perubahan besar pada VIM, VFB, serta ketahanan deformasi plastis, sehingga kontrol ini menjadi prasyarat interpretasi kinerja Marshall yang sah (Putra et al., 2023). Keberadaan tahap ekstraksi juga selaras dengan pendekatan desain campuran yang menekankan konsistensi binder efektif sebagai faktor dominan dalam membangun struktur mastic dan stabilitas internal campuran, khususnya pada lapis aus AC-WC yang menerima beban lalu lintas berulang dan variasi temperatur permukaan yang tinggi (Bela, 2024).

Tabel 3. Hasil Uji Ekstraksi Kadar Aspal Campuran AC-WC

No	Pengujian Material	Rumus	Berat I (gr)	Berat II (gr)	Satuan
A	Berat Cawan	–	52	52	gr
B	Berat Aspal + Cawan Sebelum	–	452	452	gr
C	Berat Aspal + Cawan Sesudah Berat	–	429,6	436,6	gr
D	Sebelum Ekstraksi	(B – A)	400	400	gr
E	Berat Sesudah Ekstraksi	(C – A)	377,6	384,6	gr
F	Berat Kertas	–	5,2	3,4	gr
G	Berat Total Mineral	(C – A – F)	372,4	381,2	gr
H	Berat Aspal dalam Campuran	(D – G)	27,6	18,8	gr
I	Persen Aspal dalam Campuran	(H/D × 100)	6,9	4,7	%
Rata-rata		–	5,80	–	%

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kadar aspal aktual campuran yang diperoleh dari dua replikasi menghasilkan nilai 6,9% dan 4,7%, dengan rata-rata 5,80%, sehingga secara numerik berada pada kisaran kadar aspal yang lazim untuk AC-WC pada desain campuran berbasis Marshall. Meskipun rata-rata tersebut dapat diterima sebagai kadar binder efektif, selisih antar replikasi sebesar 2,2% mengindikasikan adanya variasi proses yang patut dikritisi, karena pada pengujian laboratorium yang terkontrol deviasi kadar aspal idealnya relatif kecil agar ketidakpastian terhadap parameter volumetrik dapat diminimalkan. Variasi ini dapat berasal dari perbedaan tingkat kehilangan binder saat pemanasan dan pencampuran, variasi distribusi binder pada agregat akibat homogenisasi yang tidak identik, atau perbedaan massa mineral yang tertahan pada kertas filter, yang secara langsung memengaruhi nilai G dan akhirnya memengaruhi perhitungan H. Dalam penelitian campuran beraspal, fluktuasi kadar binder efektif merupakan salah satu penyebab utama inkonsistensi hasil Marshall, karena stabilitas dan flow sangat sensitif terhadap perubahan fraksi binder yang membentuk film aspal di sekitar agregat, terutama pada campuran lapis aus yang memiliki fraksi agregat halus tinggi (Gomies et al., 2024). Pada penelitian modifikasi berbasis polimer, variasi kadar binder menjadi lebih kritis karena EPS dapat meningkatkan viskositas binder dan mengubah kemampuan binder melapisi agregat, sehingga kehilangan binder atau

segregasi binder akan menghasilkan efek yang tampak lebih besar dibanding campuran konvensional (Yuniarti et al., 2022).

Kadar aspal rata-rata 5,80% pada penelitian ini memiliki relevansi teoritis terhadap pembentukan struktur volumetrik, karena kadar binder yang moderat cenderung meningkatkan VFB dan menurunkan VIM sampai titik optimum, sebelum kemudian memicu bleeding atau penurunan stabilitas akibat kelebihan binder. Pada studi-studi AC-WC yang memanfaatkan modifikasi plastik, kadar binder yang tidak terkendali sering menyebabkan interpretasi keliru ketika peningkatan stabilitas dianggap murni akibat aditif, padahal dapat terjadi karena kadar binder efektif lebih rendah sehingga campuran menjadi lebih kaku (Ichsan et al., 2023). Dengan memasukkan uji ekstraksi, penelitian ini secara metodologis memperkuat validitas internal karena kadar binder aktual diketahui, sehingga pembacaan efek wood ash dan EPS terhadap stabilitas dan flow dapat dikaitkan dengan mekanisme material, bukan sekadar variasi kadar aspal. Wood ash sebagai filler berpotensi meningkatkan kebutuhan binder efektif karena permukaan spesifiknya dapat menyerap fraksi ringan aspal, sehingga kadar binder yang sama secara nominal dapat menghasilkan binder efektif yang berbeda secara fungsional pada campuran (Kurnia et al., 2023; Setiawan & Widayanti, 2025). Kondisi ini menjadi lebih kompleks ketika EPS dimasukkan, karena EPS dapat berperan sebagai modifikator yang mengubah viskositas binder dan mempertebal film aspal, yang pada akhirnya memengaruhi hasil ekstraksi melalui perubahan distribusi binder pada agregat (Tisnawan et al., 2025; Lebang et al., 2024).

Secara kritis, hasil ekstraksi juga dapat dibaca sebagai indikator awal terhadap potensi durabilitas dan resistensi terhadap perendaman, karena kadar binder efektif yang terlalu rendah akan meningkatkan porositas dan memperbesar jalur masuk air, sedangkan kadar binder terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko bleeding dan penurunan stabilitas pada temperatur tinggi. Studi terkait styrofoam menunjukkan bahwa modifikasi polystyrene dapat meningkatkan ketahanan terhadap perendaman pada kondisi tertentu, namun efek tersebut sangat dipengaruhi oleh kadar binder efektif dan kemampuan binder termodifikasi membentuk ikatan adhesif yang stabil terhadap agregat (Afra et al., 2025; Rosyad & Sari, 2024). Oleh karena itu, kadar aspal rata-rata 5,80% perlu diposisikan sebagai baseline yang mengikat interpretasi parameter Marshall pada tahap berikutnya, terutama pada pembahasan VIM, VFB, stabilitas, dan MQ yang sangat bergantung pada fraksi binder. Dalam kerangka spesifikasi Bina Marga, kadar aspal optimum bukan hanya persoalan memenuhi angka volumetrik, melainkan memastikan keseimbangan antara stabilitas struktural, fleksibilitas deformasi, dan ketahanan jangka panjang terhadap kerusakan akibat air maupun beban berulang (Bela, 2024). Dengan demikian, uji ekstraksi pada penelitian ini tidak hanya menghasilkan angka kadar aspal, tetapi juga membentuk fondasi analitis untuk menilai apakah kinerja Marshall pada variasi wood ash 4% dan EPS 0–1,5% benar-benar mencerminkan efek modifikasi material terhadap sistem AC-WC.

Karakteristik Marshall AC-WC Modifikasi Wood Ash 4% dan Variasi Styrofoam EPS

Kinerja campuran AC-WC yang dimodifikasi dengan wood ash 4% dan variasi kadar Styrofoam EPS 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5% menunjukkan pola respons mekanik–volumetrik yang tidak linear, yang mengindikasikan adanya interaksi kompleks antara perubahan struktur mastic dan redistribusi rongga internal campuran. Parameter Marshall diposisikan sebagai indikator utama untuk menilai ketahanan terhadap deformasi plastis, kemampuan menahan beban, dan stabilitas struktural campuran pada kondisi pembebanan standar laboratorium. Secara konseptual, penambahan material polimer seperti EPS cenderung meningkatkan viskoelastisitas binder, sehingga campuran dapat mengalami peningkatan fleksibilitas, namun pada kadar tertentu dapat menurunkan kekuatan internal akibat berkurangnya adhesi efektif antara agregat dan binder. Temuan ini relevan dengan penelitian terdahulu yang menekankan bahwa substitusi Styrofoam pada campuran AC-WC dapat memperbaiki karakter tertentu seperti fleksibilitas dan ketahanan deformasi, tetapi juga berpotensi menurunkan stabilitas bila komposisi tidak berada pada rentang optimum (Lebang et al., 2024; Tisnawan et al., 2025). Dengan pendekatan empiris kuantitatif berbasis laboratorium, hasil pengujian Marshall pada variasi EPS menjadi dasar untuk menilai apakah modifikasi ini menghasilkan campuran yang memenuhi batas spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 serta dapat dipertimbangkan dalam rancangan Job Mix Design.

Pada aspek volumetrik, nilai VMA pada seluruh variasi EPS berada di atas batas minimum 15%, sehingga secara teoritis menunjukkan bahwa struktur agregat menyediakan ruang yang cukup untuk binder dan rongga udara, yang menjadi prasyarat utama durabilitas lapis aus. Namun, meskipun VMA

terpenuhi, nilai VIM memperlihatkan variasi yang lebih kritis karena beberapa kadar EPS menghasilkan rongga udara di luar rentang spesifikasi 3–5%, yang secara langsung berkaitan dengan risiko permeabilitas tinggi atau bleeding. Nilai VIM yang terlalu tinggi dapat mempercepat penetrasi air dan oksidasi binder, sedangkan VIM yang terlalu rendah dapat meningkatkan risiko deformasi permanen pada temperatur tinggi akibat berlebihnya binder efektif. Dinamika ini sejalan dengan studi yang menyatakan bahwa modifikasi binder berbasis limbah polimer dapat mengubah sifat viskositas dan workability, sehingga berdampak langsung pada pembentukan rongga saat pemandatan Marshall (Yuniarti et al., 2022; Delani & Patriotika, 2025). Dengan demikian, evaluasi volumetrik tidak dapat berdiri sendiri, tetapi harus dikaitkan secara simultan dengan stabilitas, flow, dan MQ agar interpretasi kinerja campuran tidak bias pada satu indikator tunggal.

Tabel 4. Hasil Uji Marshall Campuran AC-WC (Wood Ash 4%) dengan Variasi Styrofoam EPS 0%, 0,5%, 1%, 1,5%

Kode	Wood Ash (%)	EPS (%)	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
Rata-rata W4%S0%	4	0	20,00	7,14	64,44	575,93	2,77	208,17
Rata-rata W4%S0,5%	4	0,5	20,61	5,47	74,87	503,94	3,60	139,98
Rata-rata W4%S1%	4	1	23,81	7,55	68,43	664,28	5,20	127,75
Rata-rata W4%S1,5%	4	1,5	22,43	3,71	84,08	824,63	3,87	213,27

Sumber: Hasil Penelitian, 2026.

Berdasarkan Tabel 4, dapat diamati bahwa peningkatan kadar EPS dari 0% menjadi 1,5% menghasilkan perubahan yang cukup kontras pada parameter kunci, khususnya stabilitas, VIM, flow, dan VFB, yang mencerminkan pergeseran perilaku campuran dari dominasi rongga tinggi menuju struktur yang lebih rapat. Pada EPS 0% dan 1%, VIM berada pada 7,14% dan 7,55% yang melampaui batas spesifikasi, sehingga campuran berpotensi lebih porous dan lebih rentan terhadap infiltrasi air serta degradasi adhesi binder-agregat. Sebaliknya, EPS 1,5% menghasilkan VIM 3,71% yang berada dalam rentang spesifikasi, sehingga secara volumetrik campuran tersebut memiliki konfigurasi rongga yang lebih sesuai untuk lapis aus. Peningkatan VFB hingga 84,08% pada EPS 1,5% menunjukkan bahwa proporsi rongga yang terisi aspal meningkat secara signifikan, yang dapat meningkatkan kohesi internal campuran bila binder tetap stabil terhadap temperatur. Pola ini konsisten dengan literatur yang menekankan bahwa polimer berbasis limbah dapat meningkatkan kemampuan binder dalam melapisi agregat dan menurunkan rongga efektif, namun efeknya bergantung pada dosis dan kompatibilitas campuran (Rosyad & Sari, 2024; Afra et al., 2025).

Kinerja stabilitas Marshall pada variasi EPS menunjukkan bahwa hanya kadar 1,5% yang mencapai nilai di atas 800 kg, yakni 824,63 kg, sehingga menjadi satu-satunya komposisi yang memenuhi batas minimum spesifikasi. Variasi EPS 0%, 0,5%, dan 1% menghasilkan stabilitas 575,93 kg, 503,94 kg, dan 664,28 kg yang seluruhnya berada di bawah persyaratan, sehingga secara struktural kurang memadai untuk kondisi lalu lintas yang menuntut daya dukung tinggi. Secara mekanistik, rendahnya stabilitas pada kadar EPS rendah dapat dikaitkan dengan tingginya VIM yang mengurangi area kontak antar agregat dan menurunkan interlocking, sehingga transfer beban lebih banyak bergantung pada binder yang relatif lebih lunak. Kenaikan stabilitas pada EPS 1,5% dapat ditafsirkan sebagai indikasi bahwa EPS pada kadar tersebut berhasil membentuk jaringan pengikat tambahan dalam mastic, sehingga meningkatkan kohesi dan kekakuan relatif campuran. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa penggunaan limbah Styrofoam pada campuran AC-WC dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban pada kadar optimum, meskipun pada kadar tertentu dapat menurunkan stabilitas akibat perubahan workability dan distribusi binder (Lebang et al., 2024; Tisnawan et al., 2025).

Parameter flow menunjukkan bahwa EPS 1% menghasilkan nilai flow tertinggi yaitu 5,20 mm, yang melampaui rentang spesifikasi 2–4 mm, sehingga mengindikasikan kecenderungan deformasi plastis yang lebih besar saat menerima beban. Kondisi ini dapat ditafsirkan sebagai akibat dominasi sifat viskoelastis binder yang meningkat tanpa diimbangi oleh struktur agregat yang rapat, sebagaimana tercermin dari VIM 7,55% yang masih tinggi. Pada EPS 0%, 0,5%, dan 1,5%, flow berada pada 2,77 mm, 3,60 mm, dan 3,87 mm, yang seluruhnya masih berada dalam rentang spesifikasi. Secara teknis, flow yang terlalu tinggi dapat menjadi indikator awal rutting pada temperatur layanan tinggi, terutama pada perkerasan lapis aus yang menerima beban repetitif. Oleh karena itu, meskipun EPS 1% memberikan VFB yang memenuhi, tingginya flow dan VIM yang melampaui batas menandakan bahwa campuran tersebut tidak stabil secara deformasi. Fenomena ini mendukung argumentasi bahwa polimer dapat meningkatkan fleksibilitas, tetapi perlu dikontrol agar tidak mengorbankan kekakuan struktural campuran (Ichsan et al., 2023; Yuniarti et al., 2022).

Marshall Quotient (MQ) sebagai rasio stabilitas terhadap flow menggambarkan kekakuan relatif campuran dan sering dipakai sebagai indikator kemampuan campuran menahan deformasi permanen. Pada Tabel 4, nilai MQ seluruh variasi berada di bawah 500 kg/mm, sehingga tidak memenuhi batas spesifikasi, dengan nilai tertinggi pada EPS 1,5% yaitu 213,27 kg/mm. Meskipun demikian, peningkatan MQ pada EPS 1,5% dibandingkan EPS 0,5% dan 1% menunjukkan adanya peningkatan kekakuan relatif yang konsisten dengan kenaikan stabilitas serta flow yang masih terkendali. Nilai MQ yang rendah dapat mengindikasikan bahwa campuran masih memiliki potensi deformasi permanen, terutama pada temperatur tinggi, sehingga perlu dikaji lebih lanjut melalui pengujian lanjutan seperti wheel tracking atau dynamic modulus. Literatur juga menegaskan bahwa parameter Marshall saja sering tidak cukup untuk memprediksi kinerja lapangan, terutama pada campuran modifikasi polimer yang memiliki respons viskoelastik kompleks (Aszharri et al., 2024; Sulistyo et al., 2024). Dengan demikian, hasil MQ dalam studi ini harus diposisikan sebagai indikator awal yang memerlukan validasi lanjutan melalui pendekatan mekanistik–empiris.

Kecenderungan peningkatan VFB pada kadar EPS lebih tinggi, terutama pada EPS 1,5% yang mencapai 84,08%, menandakan bahwa rongga dalam agregat lebih banyak terisi binder, yang secara teoritis meningkatkan durabilitas dan menurunkan permeabilitas. Namun, VFB yang terlalu tinggi juga dapat menjadi indikator potensi bleeding jika binder efektif meningkat melebihi kebutuhan struktural, terutama pada kondisi temperatur tinggi. Dalam konteks hasil penelitian ini, risiko bleeding tampak lebih kecil karena nilai VIM masih berada pada 3,71%, sehingga ruang rongga udara masih tersedia untuk mengakomodasi ekspansi binder. Keunggulan volumetrik ini dapat menjadi alasan mengapa stabilitas pada EPS 1,5% meningkat hingga memenuhi spesifikasi, karena binder yang lebih efektif melapisi agregat dapat meningkatkan kohesi internal. Studi tentang penggunaan filler alternatif seperti silica fume, abu batu, dan limbah serbuk kayu juga menunjukkan bahwa kualitas mastic dan keterisian rongga merupakan determinan utama stabilitas dan durabilitas AC-WC (Lubis et al., 2024; Kurniawan et al., 2024; Setiawan & Widayanti, 2025). Oleh karena itu, peningkatan VFB pada EPS 1,5% dapat ditafsirkan sebagai indikator bahwa sistem binder–filler yang terbentuk memiliki kompatibilitas lebih baik dibanding variasi lainnya.

Perubahan VMA dari 20,00% pada EPS 0% menjadi 23,81% pada EPS 1% kemudian turun menjadi 22,43% pada EPS 1,5% menunjukkan bahwa EPS tidak hanya memengaruhi binder, tetapi juga memengaruhi konfigurasi struktur agregat melalui efek workability saat pencampuran dan pematatan. VMA yang meningkat dapat berarti struktur agregat lebih terbuka, yang tidak selalu buruk jika VIM dapat dikendalikan, tetapi pada EPS 1% terlihat bahwa VIM tetap tinggi sehingga peningkatan VMA justru memperburuk porositas efektif. Kondisi ini menegaskan bahwa perubahan VMA harus dibaca bersama VIM dan VFB untuk menilai keseimbangan volumetrik. Hasil ini sejalan dengan temuan pada penelitian campuran aspal poros yang menunjukkan bahwa perubahan sifat binder dan filler dapat menggeser struktur internal campuran, memengaruhi distribusi void dan stabilitas (Fadly, 2025; Aszharri et al., 2024). Selain itu, faktor temperatur dan jarak penghamparan juga diketahui dapat memengaruhi perubahan suhu campuran, yang pada gilirannya memengaruhi densifikasi dan pembentukan rongga, sehingga kontrol proses menjadi aspek penting pada campuran modifikasi (Gomies et al., 2024). Dengan demikian, variasi EPS pada studi ini tidak hanya berdampak pada sifat binder, tetapi juga pada perilaku pematatan yang menentukan struktur volumetrik akhir.

Jika dikaitkan dengan konsep campuran aspal panas, keberhasilan komposisi EPS 1,5% dalam memenuhi parameter utama VMA, VIM, VFB, stabilitas, dan flow dapat ditafsirkan sebagai indikasi

tercapainya keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas. Stabilitas yang memenuhi menunjukkan kemampuan menahan beban, sedangkan flow yang masih berada dalam rentang spesifikasi menandakan deformasi plastis masih terkendali. VIM yang sesuai menunjukkan struktur rongga yang cukup rapat untuk durabilitas namun tidak terlalu padat hingga menimbulkan bleeding, sedangkan VFB yang tinggi menandakan keterisian binder yang kuat untuk meningkatkan kohesi. Dalam perspektif kinerja lapangan, kombinasi tersebut penting untuk lapis aus karena lapisan ini berfungsi sebagai lapisan kontak langsung dengan beban kendaraan dan lingkungan, sehingga membutuhkan ketahanan terhadap rutting, retak, dan kerusakan akibat air. Penelitian lain pada AC-WC dengan aditif lain seperti resin, asbuton, karet remah, dan serbuk ban juga menunjukkan bahwa komposisi optimum biasanya muncul ketika parameter volumetrik dan mekanik mencapai titik kompromi, bukan pada nilai ekstrem satu parameter (Samudro & Rahardjo, 2024; Assiddiqie et al., 2024; Ulfah, 2023; Putra et al., 2023). Dengan demikian, EPS 1,5% pada wood ash 4% dapat diposisikan sebagai kandidat komposisi optimum dalam ruang desain yang diuji pada penelitian ini.

Meskipun EPS 1,5% menghasilkan stabilitas memenuhi spesifikasi, nilai MQ tetap berada jauh di bawah batas 500 kg/mm, sehingga menunjukkan bahwa campuran masih relatif lunak dalam konteks kekakuan yang diharapkan. Hal ini dapat dipahami karena MQ merupakan indikator yang sangat sensitif terhadap perubahan flow, dan campuran modifikasi polimer cenderung mempertahankan deformasi lebih besar meskipun stabilitas meningkat. Selain itu, pendekatan Marshall secara metodologis memiliki keterbatasan dalam memodelkan respons viskoelastis kompleks, terutama untuk binder modifikasi polimer, sehingga hasil MQ harus diperlakukan sebagai indikasi awal. Keterbatasan ini juga ditegaskan oleh penelitian yang menganalisis kinerja perkerasan dengan pendekatan mekanistik seperti KENPAVE, yang menunjukkan bahwa parameter laboratorium konvensional perlu dikonversi ke parameter struktural agar dapat memprediksi kinerja jangka panjang (Aszharri et al., 2024). Dalam konteks ini, EPS 1,5% dapat dianggap memenuhi persyaratan minimum untuk stabilitas dan volumetrik, namun masih memerlukan penguatan desain atau validasi lanjutan untuk memastikan kekakuan yang memadai. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang menguji fatigue, ketahanan air, atau rutting akan menjadi langkah yang relevan untuk mengonfirmasi apakah nilai MQ rendah benar-benar berimplikasi negatif pada kinerja lapangan, sebagaimana juga direkomendasikan dalam studi durabilitas AC-WC dan campuran sejenis (Bela, 2024; Afra et al., 2025).

Secara komparatif, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa variasi EPS tidak memberikan tren peningkatan stabilitas yang linier, melainkan menunjukkan adanya titik optimum pada EPS 1,5% untuk kombinasi wood ash 4%. EPS 0,5% memberikan VFB yang memenuhi, tetapi stabilitas justru turun menjadi 503,94 kg, yang dapat mengindikasikan bahwa binder menjadi lebih plastis tanpa densifikasi yang cukup, sehingga struktur campuran melemah. EPS 1% meningkatkan stabilitas menjadi 664,28 kg, tetapi flow meningkat tajam hingga 5,20 mm dan VIM tetap tinggi, sehingga campuran menjadi lebih rentan deformasi. EPS 1,5% menghasilkan peningkatan stabilitas paling signifikan sekaligus memperbaiki VIM dan mempertahankan flow dalam batas spesifikasi, sehingga menjadi kombinasi terbaik dari sisi compliance-based validation. Temuan ini konsisten dengan penelitian lain tentang penggunaan limbah Styrofoam dalam campuran aspal, yang umumnya menemukan bahwa kadar optimum berada pada rentang tertentu, sementara kadar yang lebih rendah atau lebih tinggi dapat menghasilkan ketidakseimbangan antara stabilitas dan deformasi (Delani & Patriotika, 2025; Rosyad & Sari, 2024). Dengan demikian, interpretasi ilmiah dari data Marshall menegaskan bahwa modifikasi EPS bekerja efektif hanya ketika kadar berada pada tingkat yang mampu meningkatkan kohesi binder tanpa mengganggu struktur agregat.

Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa campuran AC-WC dengan wood ash 4% dan EPS 1,5% dapat dipertimbangkan sebagai kandidat desain campuran yang memenuhi sebagian besar parameter spesifikasi utama, terutama stabilitas, VIM, VMA, VFB, dan flow. Namun, karena MQ belum memenuhi spesifikasi, campuran ini tidak dapat langsung dianggap final tanpa pengujian tambahan yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Pada implementasi perkerasan jalan, lapis aus harus mampu menahan beban repetitif dan perubahan temperatur, sehingga indikator ketahanan deformasi permanen dan ketahanan retak perlu diuji menggunakan metode lanjutan. Literatur juga menunjukkan bahwa faktor durabilitas, terutama ketahanan terhadap air dan kondisi perendaman, menjadi isu kritis pada campuran modifikasi limbah polimer, karena perubahan sifat adhesi dapat terjadi seiring waktu (Afra et al., 2025; Bela, 2024). Selain itu, penelitian pada campuran dengan filler limbah kayu menekankan pentingnya karakteristik filler terhadap stabilitas mastic dan daya lekat binder-

agregat, sehingga konsistensi kualitas wood ash menjadi aspek yang harus dikontrol pada skala produksi (Kurnia et al., 2023; Pratama & Hadi, 2024). Oleh karena itu, hasil Marshall pada penelitian ini merupakan dasar kuat untuk menyatakan adanya peningkatan kinerja pada EPS 1,5%, namun tetap membutuhkan kerangka evaluasi lanjutan agar dapat direkomendasikan secara teknis untuk penerapan lapangan.

KESIMPULAN

Penelitian eksperimen laboratorium ini menunjukkan bahwa modifikasi campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) menggunakan wood ash sebagai filler dan Styrofoam Expanded Polystyrene (EPS) sebagai bahan tambah menghasilkan perubahan kinerja yang nyata pada parameter volumetrik dan mekanik berdasarkan uji penetrasi, ekstraksi, dan Marshall. Aspal yang digunakan terverifikasi berada pada klasifikasi penetrasi 60/70 dengan nilai rata-rata 69,4, sehingga kesesuaian material dasar terhadap standar menjadi fondasi valid untuk interpretasi hasil. Hasil ekstraksi menunjukkan kadar aspal rata-rata 5,80% yang menegaskan konsistensi komposisi binder aktual dalam campuran dan memperkuat reliabilitas analisis parameter Marshall. Pada variasi wood ash 4% dengan EPS 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%, hanya kadar EPS 1,5% yang mampu memenuhi secara simultan batas spesifikasi utama Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 pada VIM (3,71%), VMA (22,43%), VFB (84,08%), stabilitas (824,63 kg), dan flow (3,87 mm), sehingga kombinasi ini dinilai sebagai konfigurasi paling optimum pada skema pengujian yang dilakukan. Meskipun demikian, seluruh variasi menunjukkan nilai Marshall Quotient (MQ) yang belum memenuhi persyaratan, yang mengindikasikan bahwa campuran masih memiliki keterbatasan pada rasio kekakuan terhadap deformasi dan memerlukan penguatan desain melalui optimasi lanjutan, pengujian durabilitas jangka panjang, serta evaluasi performa lanjutan seperti ketahanan terhadap perendaman dan kelelahan untuk memastikan kelayakan penerapan pada kondisi lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afra, L., Usrina, N., Amna, K., Abdullah, Z., & Mukhlis, M. (2025). Effect Of Styrofoam Waste Substitution On The Performance Of Asphalt Concrete Wearing Course In Cattle Manure Immersion. *Electronic Journal Of Education, Social Economics And Technology*, 6(2), 1067. <Https://Doi.Org/10.33122/Ejeset.V6i2.1067>
- Assiddiqie, T. M., Nurmayadi, A. R., & Nurmayadi, D. (2024). Studi Penggunaan Asbuton Pada Campuran Aspal Panas Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc). *Jitsi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 4(2), 116-128. <Https://Doi.Org/10.36423/Jitsi.V4i2.2108>
- Aszharri, A., Susetyo, D. A., & Sulaiman, S. (2024). Kinerja Struktur Perkerasan Aspal Porus Modifikasi Dengan Pemodelan Program Kenpave. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 13(2), 91-102. <Https://Doi.Org/10.35139/Cantilever.V13i2.363>
- Bela, K. R. (2024). Analisis Nilai Durabilitas Lataston Hrs-Wc Dan Laston Ac-Wc Menggunakan Material Agregat Bulat Pada Pemadatan Sedang. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 6(1), 30-38. <Https://Doi.Org/10.26740/Proteksi.V6n1.P30-38>
- Delani, M. N., & Patriotika, F. (2025). Pengaruh Penambahan Limbah Styrofoam Terhadap Benda Uji Pada Ac-Wc Melalui Pengujian Marshall (In Press). <Https://Doi.Org/10.21009/Jmenara.V21i1.55499>
- Fadly, I. (2025). Analisa Campuran Aspal Poros Menggunakan Material Di Desa Lipukasi Kabupaten Baru. *Jurnal Teknik Silitek*, 5(02), 584-593. <Https://Doi.Org/10.51135/D2sjfa14>
- Gomies, G. J., Purwanto, H., & Soumokil, M. D. (2024). Pengaruh Jarak Penghamparan Terhadap Perubahan Suhu Campuran Ac-Wc. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, 1(7), 799-809. <Https://Doi.Org/10.59837/Jpnmb.V1i7.138>
- Ichsan, I., Olii, A., Hidayat, A. S., & Antau, N. F. (2023). Analysis Of Marshall Characteristics Based On The Use Of Hdpe Plastic As A Particular Replacement Of Asphalt In Ac-Wc Wear Layers: Analisis Karakteristik Marshall Berdasarkan Penggunaan Plastik Hdpe Sebagai Pengganti Sebagian Aspal Pada Lapis Aus Ac-Wc. *Jurnal Simetrik*, 13(2), 716-722. <Https://Doi.Org/10.31959/Js.V13i2.1949>
- Kurnia, A., Sutoyo, L. A., & Putri, A. R. (2023). Pengaruh Limbah Abu Kayu Bakar Sebagai Filler Pada Campuran Aspal Concreat-Binder Course (Ac-Bc). *Prosiding Semsina*, 4(2), 199-206. <Https://Doi.Org/10.36040/Semsina.V4i2.8055>

- Kurniawan, S., Hadijah, I., & Yani, R. P. (2024). Pengaruh Aspal Karet Pada Campuran Ac-Wc Menggunakan Filler Abu Batu Marmer Dengan Metode Marshall. *Tapak (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 14(1), 11-22. <Http://Dx.Doi.Org/10.24127/Tp.V14i1.3831>
- Lebang, J. R. ., Rachman, R., & Alpius. (2024). Pengaruh Penambahan Limbah Styrofoam Terhadap Karakteristik Campuran Ac-Wc. *Paulus Civil Engineering Journal*, 4(2), 289-297. <Https://Doi.Org/10.52722/Hpa8ed90>
- Lubis, A. S., Muis, Z. A., Anas, R., Rambe, A. P., & Sarah, C. A. (2024). Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Karakteristik Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (Ac-Wc). *Blend Sains Jurnal Teknik*, 2(3), 228-234. <Https://Doi.Org/10.56211/Blendsains.V2i3.393>
- Pranoto, A. F., & Aswin, M. (2025). Investigasi Pada Komposit Yang Terbentuk Dari Cr-Ecc Dengan Kerikil-Aspal Porus Berbasis Styrofoam Berdasarkan Uji Tekan Dan Lentur. *Jurnal Sosial Dan Sains*, 5(10), 7380-7390. <Https://Doi.Org/10.59188/Jurnalsosains.V5i10.32474>
- Pratama, F. Y., & Hadi, M. A. (2024). Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Mindi Sebagai Filler Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (Sma). *Agregat*, 9(2), 1162-1170. <Https://Doi.Org/10.30651/Ag.V9i2.24554>
- Putra, M. T., Destania, H. R., & Febryandi, F. (2023). Analisis Karakteristik Marshall Campuran Aspal Modifikasi Pada Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc) Dengan Penambahan Serbuk Ban Kendaraan. *Jurnal Teknik Sipil*, 19(2), 335-350. <Https://Doi.Org/10.28932/Jts.V19i2.5580>
- Rosyad, F., & Sari, I. P. (2024). Analisis Pengaruh Penambahan Limbah Styrofoam Pada Aspal Poros Ac Wc Terhadap Durabilitas Dan Fleksibilitasnr. *Ensiklopedia Of Journal*, 6(3), 305-309. <Https://Doi.Org/10.33559/Eoj.V6i3.2297>
- Samudro, R. A., & Rahardjo, B. (2024). Analisis Kinerja Ac-Wc (Asphalt Concrete-Wearing Course) Menggunakan Resin Lycal Ditinjau Dari Parameter Marshall (Performance Analysis Of Ac-Wc). *Jurnal Jalan Jembatan*, 41(1), 53-60. <Https://Doi.Org/10.58499/Jatan.V41i1.1180>
- Setiawan, M. A., & Widayanti, A. (2025). Karakteristik Limbah Filler Abu Serbuk Kayu Jati Dan Material Agregat Alam Untuk Campuran Perkerasan Aspal Pada Lapisan Permukaan (Asphalt Concrete-Wearing Course). *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 232-239. <Https://Doi.Org/10.26740/Mitrans.V3n3.P232-239>
- Sulistyo, J. A., Azizah, N. U., & Hapsari, A. (2024). Analysis Of Wear-Coated Asphalt Concrete (Ac-Wc) Modified With Addition Of Steel Slag And Resin For Road Conditions Inlowed In Tide. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 1321(1). <Https://Doi.Org/10.1088/1755-1315/1321/1/012023>
- Tisnawan, R., Husaini, R. R., Yazid, M., & Saventina, E. M. (2025). Analisis Karakteristik Marshall Dari Campuran Aspal Beton Lapis Aus (Ac-Wc) Dengan Penambahan Limbah Styrofoam (Polystyrene) Pada Aspal Penetrasi 60/70. *Impression: Jurnal Teknologi Dan Informasi*, 4(1), 83-89. <Https://Doi.Org/10.59086/Jti.V4i1.892>
- Ulfah, L. (2023). Pengaruh Karet Remah Terhadap Stabilitas Campuran Beraspal Laston Ac-Wc Menggunakan Metode Dry Mix. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 12(1), 9-18. <Https://Doi.Org/10.35139/Cantilever.V12i1.207>
- Yuniarti, R., Mahendra, M., Karyawan, I. A., Widiyanty, D., & Hasyim, H. (2022). Pengaruh Viskositas Aspal Modifikasi Limbah Styrofoam Dan Limbah Pvc Terhadap Sifat Volumetrik Campuran Laston: Effect Of Waste Styrofoam And Waste Pvc Modified Asphalt Viscosity On Volumetric Properties Of Asphalt Concrete. *Spektrum Sipil*, 9(2), 143-150. <Https://Doi.Org/10.29303/Spektrum.V9i2.247>