Jurnal Sosial dan Teknologi (SOSTECH)
Volume 6, Number 10, Oktober 2026, pp. 3182-3197
e-ISSN 2774-5155
https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v6i10.33012

Kadar Styrofoam 4% Menjadi Variasi Terpilih pada Campuran AC-WC Berdasarkan Parameter Marshall

Chrisye Prisilia Tinungki*, Mario Marthen Luther Moningka, Rilya Rumbayan
Politeknik Negeri Manado, Indonesia
Email: mariomoningka4@gmail.com*

Keywords:
AC-WC; Dry Process; Marshall Characteristics; Styrofoam Waste; Waste-Modified Asphalt

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Publikasiku Publisher

Abstract

This study determines the selected waste Styrofoam content in Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixtures and evaluates changes in Marshall characteristics relative to a mixture without Styrofoam. A laboratory experiment used the dry process at a selected asphalt content of 6.50%. Styrofoam was added at 0%, 2%, 4%, and 6% by asphalt weight, with three specimens prepared for each variation. Stability, flow, VIM, VMA, VFB, and Marshall Quotient were evaluated against the 2018 Revision 2 General Specifications of Bina Marga. The control mixture produced a stability of 1,467.14 kg. Styrofoam contents of 2%, 4%, and 6% produced stability values of 904.72 kg, 1,313.54 kg, and 1,834.10 kg, respectively. The 2% and 4% mixtures satisfied all required Marshall parameters, whereas the 6% mixture failed the VIM, VFB, and flow requirements. The 4% content was selected among the Styrofoam-added mixtures because it provided higher stability than 2% while remaining compliant with all required parameters; however, its stability did not exceed that of the control mixture. Under the tested local aggregate and mixing conditions, 4% Styrofoam is the most suitable added-content variation based on the combined Marshall criteria. The findings are limited to the laboratory materials and procedure used, and durability, moisture susceptibility, and field-performance testing are required before broader application.

Kata Kunci:
AC-WC; Karakteristik Marshall; Limbah Styrofoam; Metode Kering; Aspal Modifikasi Limbah

Abstrak

Penelitian ini menentukan kadar limbah Styrofoam terpilih pada campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) dan mengevaluasi perubahan karakteristik Marshall dibandingkan campuran tanpa Styrofoam sebagai kontrol pada material lokal Sulawesi Utara. Eksperimen laboratorium menggunakan metode kering dengan kadar aspal terpilih 6,50%. Styrofoam ditambahkan sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap berat aspal; tiga benda uji digunakan untuk setiap variasi. Parameter yang dievaluasi meliputi stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Campuran kontrol menghasilkan stabilitas 1.467,14 kg. Penambahan Styrofoam 2%, 4%, dan 6% menghasilkan stabilitas masing-masing 904,72 kg, 1.313,54 kg, dan 1.834,10 kg. Variasi 2% dan 4% memenuhi seluruh parameter Marshall yang dipersyaratkan, sedangkan variasi 6% tidak memenuhi persyaratan VIM, VFB, dan flow. Kadar 4% dipilih di antara variasi dengan Styrofoam karena memberikan stabilitas lebih tinggi daripada kadar 2% dan tetap memenuhi seluruh persyaratan, tetapi stabilitasnya tidak melampaui campuran kontrol. Pada agregat lokal dan prosedur pencampuran yang diuji, kadar Styrofoam 4% merupakan

variasi tambahan yang paling sesuai berdasarkan kombinasi parameter Marshall. Temuan ini terbatas pada kondisi laboratorium dan komposisi material penelitian, sehingga pengujian durabilitas, ketahanan terhadap kelembapan, dan kinerja lapangan diperlukan sebelum penerapan yang lebih luas.

PENDAHULUAN

Seiring dengan semakin banyaknya barang dalam kehidupan sehari-hari yang terbuat dari plastik, jumlah sampah yang dihasilkannya pun menjadi masalah yang kian besar bagi lingkungan. Expanded polystyrene (EPS) atau yang juga dikenal sebagai Styrofoam merupakan salah satu jenis sampah plastik yang banyak digunakan dalam kemasan. Material ini memiliki sifat ringan, praktis, dan termasuk polimer termoplastik, tetapi sulit terurai secara alami sehingga pemanfaatan kembali menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi timbulan limbah. Penelitian mengenai pemanfaatan limbah EPS menunjukkan bahwa material tersebut memiliki potensi untuk digunakan kembali pada berbagai bidang konstruksi, termasuk sebagai bahan tambahan pada material perkerasan jalan (Al-Haydari & Masued, 2017; Akter & Raja, 2022).

Perkerasan yang terbuat dari campuran aspal dikenal sebagai perkerasan lentur dan digunakan dalam pembangunan jalan. Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) merupakan salah satu jenis campuran tersebut; lapisan ini adalah bagian yang menerima beban lalu lintas serta paparan elemen lingkungan secara langsung. Oleh karena itu, komposisi AC-WC harus memiliki sifat mekanis dan volumetrik yang memenuhi standar teknis berdasarkan kriteria Marshall (Sulianti et al., 2019; Lebang et al., 2022).

Pemanfaatan limbah Styrofoam sebagai bahan tambah pada campuran beraspal telah menunjukkan respons yang berbeda menurut kadar, jenis campuran, material agregat, dan kondisi pencampuran. (Putri & Dwinanda, 2018) menemukan perubahan karakteristik Marshall pada HRS-Base dengan penambahan 0,5–1,5%, sedangkan (Ramadan et al., 2020), (Nciri et al., 2020), dan (Yıldız et al., 2021) menunjukkan bahwa polistirena dapat memodifikasi sifat pengikat aspal, tetapi responsnya bergantung pada proporsi dan kompatibilitas material. Pada AC-WC, (Amiruddin et al., 2023) menegaskan peran temperatur pencampuran, sementara (Fahira et al., 2023) memperlihatkan bahwa substitusi Styrofoam mengubah parameter Marshall dan durabilitas. Literatur tersebut menunjukkan bahwa nilai Styrofoam yang dapat diterima tidak bersifat universal.

Studi dengan material dan kadar Styrofoam yang berbeda juga menghasilkan respons campuran yang beragam. (Paembonan et al., 2022) menggunakan agregat Batu Sungai Teik Toraja Utara dan memperoleh perubahan pada nilai flow, VIM, VMA, VFB, serta stabilitas akibat penambahan Styrofoam. Sementara itu, (Permasi et al., 2022) menggunakan Batu Sungai Pattunuang Maros dengan variasi Styrofoam 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4%, dan menunjukkan bahwa parameter Marshall campuran mengalami perubahan pada setiap variasi kadar Styrofoam.

Selain kadar bahan tambah, kondisi pencampuran juga dapat memengaruhi karakteristik campuran. (Fitriansyah et al., 2024) menunjukkan bahwa variasi temperatur pencampuran dan kadar Styrofoam menghasilkan perubahan pada parameter Marshall AC-WC. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan Styrofoam perlu dikaji dengan mempertimbangkan kadar bahan tambah, karakteristik agregat, kadar aspal, temperatur, dan metode pencampuran yang

digunakan. Penelitian (Delani, M. N., & Patriotika, 2025) juga menunjukkan adanya perubahan karakteristik Marshall akibat penambahan limbah Styrofoam.

Kesenjangan penelitian terletak pada belum konsistennya hubungan antara kadar Styrofoam dan pemenuhan parameter Marshall ketika bahan lokal, kadar aspal, dan metode pencampuran berbeda. Studi ini memfokuskan pengujian pada agregat lokal Sulawesi Utara, kadar aspal terpilih 6,50%, dan metode kering untuk membandingkan campuran kontrol dengan penambahan 2%, 4%, dan 6%. Kebaruannya bukan pada penggunaan Styrofoam semata, melainkan pada identifikasi variasi tambahan yang tetap memenuhi seluruh parameter Marshall dalam kondisi material dan prosedur tersebut, sekaligus membedakan variasi terpilih dari klaim bahwa Styrofoam selalu meningkatkan kinerja campuran.

Penelitian ini bertujuan menentukan kadar Styrofoam terpilih pada campuran AC-WC dan menjelaskan perubahan stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, serta MQ terhadap campuran kontrol. Agregat berasal dari AMP PT Rajasa Mitra Abadi, Koha, Kabupaten Minahasa, dan limbah Styrofoam berasal dari TPA Sumompo, Kota Manado. Variasi 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap massa aspal diuji pada kadar aspal terpilih 6,50% menggunakan metode kering dengan acuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Secara praktis, hasil diharapkan memberi dasar awal untuk pemanfaatan limbah Styrofoam tanpa mengabaikan persyaratan volumetrik dan mekanik campuran.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah Styrofoam terhadap karakteristik Marshall pada campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC), penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium kuantitatif. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengujian dan penyiapan material, penentuan kadar aspal berdasarkan rentang nilai yang diperoleh, pembuatan benda uji dengan variasi penambahan Styrofoam sebesar 2%, 4%, dan 6% dari berat aspal, pelaksanaan pengujian Marshall, serta analisis hasil. Mengacu pada (Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018) Revisi 2, karakteristik yang ditinjau meliputi flow, stabilitas, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient (MQ).

Lokasi Penelitian

Laboratorium Pengujian Material pada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Manado, yang memiliki peralatan untuk menguji campuran aspal menggunakan metode Marshall, digunakan sebagai lokasi penelitian berbasis laboratorium ini. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada ketersediaan peralatan pengujian lengkap seperti alat uji Marshall, oven, timbangan digital, cetakan Marshall, alat pemadat (Marshall compactor), serta water bath yang mendukung pelaksanaan penelitian secara eksperimental sesuai prosedur standar pengujian campuran AC-WC.

Lokasi Pengambilan Material

Agregat yang digunakan dalam penelitian ini diambil di AMP PT. Rajasa Mitra Abadi, Koha, Kecamatan Mandolang, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara.

Lokasi Pengambilan Bahan Tambah Limbah Styrofoam

Material limbah styrofoam yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari TPA Sumompo, Buha, Kecamatan Mapanget, Kota Manado, Sulawesi Utara.

Persiapan Alat dan Bahan

Tahap pertama yang dilakukan yaitu menyiapkan material. Bahan yang digunakan meliputi aspal penetrasi 60/70 Ex Pertamina, agregat kasar dan agregat halus yang diambil dari Quarry AMP PT. Rajasa Mitra Abadi, Koha, Kecamatan Mandolang, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara, semen Portland Ex Tonasa sebagai filler dan Bahan Tambah Styrofoam yang diambil dari TPA Sumompo, Buha, Kecamatan Mapanget, Kota Manado, Sulawesi Utara.



Gambar 1. Persiapan Bahan Tambah Styrofoam
Sumber: Dokumentasi Penulis

Kemudian menyiapkan alat-alat yang diperlukan dalam pengujian. Peralatan utama meliputi alat Marshall dan dial flow, mesin Los Angeles, satu set saringan, piknometer, oven, waterbath, timbangan, termometer, alat penumbuk.

Tahapan Pengujian

Pengujian sifat-sifat fisik seperti berat jenis curah, berat jenis, daya serap agregat, dan abrasi merupakan langkah awal dalam setiap proyek penelitian. Perencanaan Job Mix Formula (JMF) dilakukan dengan mengombinasikan ketiga fraksi agregat (split 13-19 mm, split 5-13 mm, dan abu batu 05 mm) beserta bahan pengisi (filler) berupa semen Portland (PC), dengan proporsi yang ditentukan melalui percobaan sedemikian rupa sehingga menghasilkan gradasi kombinasi terbaik yang memenuhi rentang spesifikasi gradasi AC-WC menurut (Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018). Tabel 1 menyajikan persentase rancangan campuran yang diperoleh dari proses perencanaan. Hasil analisis agregat gabungan ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Persentase Mix Design

Jenis Material	Persentase Mix Design (%)
Batu Pecah 13-19	15,0
Batu Pecah 5-13	25,0
Abu Batu	59,0
PC	1,0
Total	100

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Hasil analisis gradasi menunjukkan bahwa kombinasi agregat yang digunakan berada dalam batas gradasi campuran AC-WC yang ditetapkan. Komposisi agregat hasil Job Mix Design terdiri atas split 13–19 mm sebesar 15,0%, split 5–13 mm sebesar 25,0%, abu batu sebesar 59,0%, dan Portland cement (PC) sebagai filler sebesar 1,0%.

Tabel 2. Hasil Kombinasi Gradasi Agregat

Nomor Saringan	Hasil Kombinasi Gradasi Agregat (%)	Spesifikasi (%)
1"	100.00	100
3/4"	100.00	100
1/2"	90.36	90-100
3/8"	84.91	77-90
#4	64.73	53-69
#8	38.02	33-53
#16	23.99	21-40
#30	16.90	14-30
#50	11.48	9-22
#100	8.66	6-15
#200	7.53	4-9

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Agregat

Jenis Pengujian	Material	Hasil	Spesifikasi	Status
Abrasi Los Angeles	Agregat Kasar	28,468%	Maks 40%	Memenuhi
Berat Jenis Bulk	Agregat Kasar	2,625 gr/cc	Min 2,5 gr/cc	Memenuhi
Penyerapan	Agregat Kasar	0,217%	Maks 3%	Memenuhi
Berat Jenis Bulk	Agregat Halus	2,581 gr/cc	Min 2,5 gr/cc	Memenuhi
Penyerapan	Agregat Halus	2,124%	Maks 3%	Memenuhi
Berat Isi	Agregat	1,573 gr/cc	Tidak dipersyaratkan secara khusus	-

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Tabel 4. Standar Pengujian Material

Jenis Pengujian	Standar Pengujian
Abrasi Los Angeles	SNI 2417:2008
Analisis saringan agregat	SNI ASTM C136:2012
Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar	SNI 1969:2016
Berat jenis dan penyerapan air agregat halus	SNI 1970:2016
Pengujian Marshall	SNI 2489:2018
Spesifikasi campuran AC-WC	Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Perencanaan Campuran

Dengan nilai konstanta untuk campuran jenis AC (Asphalt Concrete) berkisar antara 0,5% - 1,0%. Berdasarkan hasil gradasi kombinasi pada saringan No. 8 dan No. 200 yang disajikan pada tabel 2, diperoleh proporsi agregat kasar (CA), agregat halus (FA), dan filler

(FF) sebagai berikut:

$$\text{Agregat Kasar (CA)} = 100\% - 38{,}02\% = 61{,}98\%$$
$$\text{Agregat Halus (FA)} = 38{,}02\% - 7{,}53\% = 30{,}49\%$$
$$\text{Filler (FF)} = 7{,}53\%$$

Untuk menghitung kadar aspal rencana digunakan persamaan:

$$Pb = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045\ (\%FA) + 0{,}18\ (\%Filler) + Konstanta$$
$$Pb = 0{,}035\ (61{,}98\%) + 0{,}045\ (30{,}49\%) + 0{,}18\ (7{,}53\%) + 0{,}75\%$$
$$Pb = 5{,}647$$

Keterangan:
Pb = kadar aspal (%)
CA = agregat kasar lolos saringan no.4 tertahan no.8
FA = agregat halus lolos saringan no.8 tertahan no.200
FF = agregat halus lolos saringan no.200
K = Konstanta

Berdasarkan perhitungan awal, nilai Pb diperoleh sebesar 5,647% dan digunakan sebagai perkiraan awal untuk menyusun rentang kadar aspal uji 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5%. Sebanyak 15 benda uji dibuat, masing-masing tiga benda uji pada setiap kadar. Nilai 5,5% tidak diperlakukan sebagai batas maksimum, melainkan sebagai salah satu titik dalam rentang pengujian. Kadar aspal terpilih selanjutnya ditentukan dari pemenuhan parameter Marshall pada rentang yang diuji.

Parameter Marshall

Setelah menguji berbagai kadar aspal (4,5; 5; 5,5; 6; dan 6,5 persen), peneliti menetapkan kadar 6,5% sebagai kadar optimal untuk penelitian mereka. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, kadar aspal 6,5% memenuhi kriteria untuk nilai VIM, VMA, VFB, stabilitas, dan flow (kelelehan), sehingga kadar ini dipilih berdasarkan hasil pengujian Marshall. Campuran yang mengandung limbah Styrofoam kemudian dicampur dengan kadar aspal 6,5% tersebut; Tabel 5 menyajikan hasilnya.

Pembuatan Benda Uji dengan Bahan Tambah Limbah Styrofoam

Setelah melakukan pengujian Marshall pada campuran aspal konvensional dengan variasi kadar aspal (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5%), spesimen campuran AC-WC yang menggunakan limbah Styrofoam sebagai bahan tambahan dibuat dengan kadar aspal terpilih sebesar 6,5%. Pada kadar aspal 6,5% tersebut, kadar polistirena yang digunakan adalah 2%, 4%, dan 6% dari massa aspal. Tidak ada bagian dari massa agregat maupun aspal yang digantikan oleh Styrofoam; bahan tersebut hanya digunakan sebagai tambahan dalam penelitian ini.

Styrofoam terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran, kemudian dikeringkan dan diparut menjadi butiran. Ukuran butiran styrofoam ditentukan menggunakan saringan No. 8 dengan ukuran bukaan 2,36 mm, sehingga material yang digunakan merupakan butiran yang tertahan pada saringan tersebut. Agregat kasar, agregat halus, dan filler disiapkan sesuai proporsi campuran yang telah ditentukan, kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu sekitar 150-155°C. Styrofoam yang telah ditimbang sesuai variasinya kemudian dicampurkan terlebih dahulu dengan agregat panas sebagai metode kering (dry process) dan diaduk secara manual selama 1-2 menit hingga Styrofoam tersebar merata pada agregat. Selanjutnya, aspal penetrasi 60/70 dipanaskan hingga berada pada rentang suhu 140°C-160°C, kemudian ditambahkan ke dalam campuran agregat dan Styrofoam. Setelah aspal melapisi seluruh agregat secara merata

dan campuran menjadi homogen, proses pencampuran dilakukan selama satu hingga tiga menit pada suhu sekitar 145 hingga 155°C. Setelah pencampuran selesai, material dituangkan ke dalam cetakan Marshall yang telah disiapkan, diratakan, dan dipadatkan menggunakan palu Marshall dengan total 150 tumbukan, yaitu 75 tumbukan pada setiap sisi spesimen. Setiap variasi kadar polistirena diwakili oleh tiga sampel, sehingga menghasilkan total sembilan spesimen. Spesimen dikeluarkan dari cetakan dan didiamkan pada suhu ruang selama sekitar 24 jam setelah pemadatan. Tinggi dan diameter spesimen kemudian diukur sebelum dilakukan pengujian Marshall. Selanjutnya, sampel menjalani tahap pengondisian selama 30 hingga 40 menit di dalam penangas air yang diatur pada suhu 60°C. Setelah dikondisikan, spesimen segera dimasukkan ke dalam alat uji Marshall dan diberi beban dengan kecepatan 50,8 mm/menit hingga mencapai beban maksimum (stabilitas) dan nilai flow (lelehan). Nilai stabilitas dikoreksi berdasarkan tinggi benda uji sesuai faktor koreksi pada SNI 2489:2018. Berat jenis bulk campuran (Gmb) diperoleh dari pengukuran berat benda uji dalam kondisi kering, jenuh kering permukaan, dan dalam air, sedangkan berat jenis maksimum teoritis (Gmm) diperoleh dari pengujian berat jenis maksimum campuran. Nilai Gmb dan Gmm selanjutnya digunakan dalam perhitungan VIM, VMA dan VFB. Seluruh tahapan penyiapan dan pengujian benda uji dilaksanakan dengan mengacu pada SNI 2489:2018, yang mengatur metode pengujian stabilitas dan pelelehan (flow) campuran aspal panas menggunakan peralatan Marshall, serta (Spesifikasi Umum Bina Marga, 2018) Revisi 2.

[DATA PENULIS DIPERLUKAN: tambahkan nilai simpangan baku/rentang atau data replikasi lengkap untuk setiap variasi Styrofoam agar variasi antar tiga benda uji dapat dilaporkan secara konsisten.]



Gambar 2. Pembuatan Benda Uji
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Kadar Aspal Terpilih Berdasarkan Rentang Kadar Aspal Yang Diuji

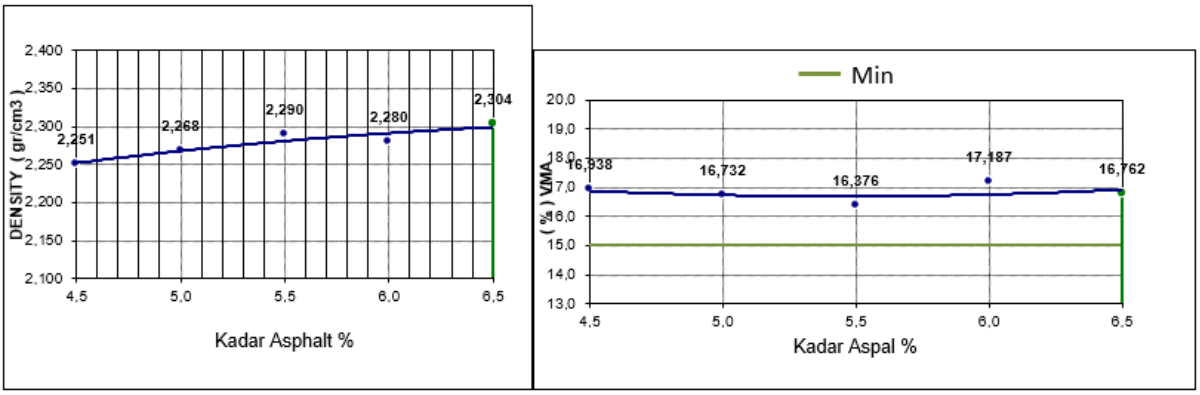
Kadar aspal terpilih diperoleh berdasarkan hasil pengujian campuran AC-WC normal pada rentang kadar aspal 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5%. Parameter Marshall yang dianalisis meliputi density, stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, dan VFB. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil Pengujian Aspal Normal Marshall Test

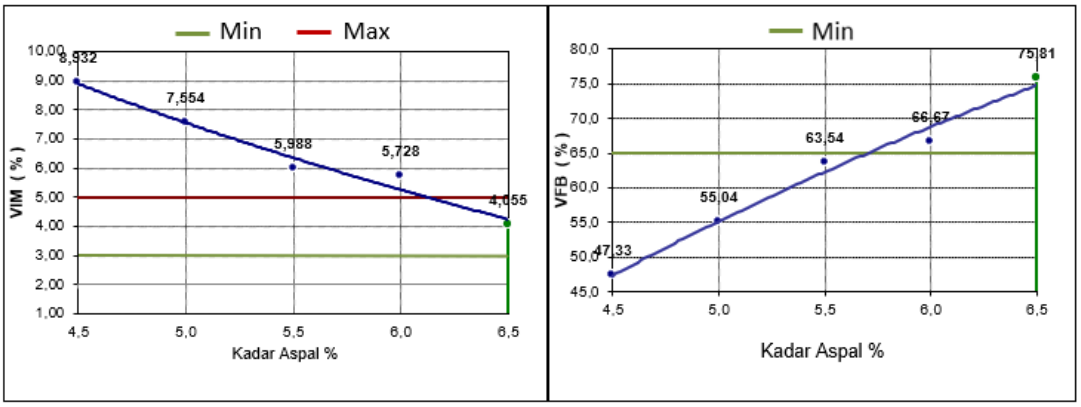
Kadar Aspal (%)	BJ.Max (gr/cm^3)	BJ.Camp (gr/cm^3)	Stab. (kg)	Flow (mm)	VFB (%)	VMA (%)	VIM (%)	MQ (kg/mm)
4.5	2.471	2.251	1116.88	4.61	47.33	16.938	8.932	242,42
5,0	2.453	2.268	1123.81	3.78	55.04	16.732	7.554	297,96
5,5	2.436	2.290	1254.64	3.76	63.54	16.376	5.988	336,62
6,0	2.418	2.280	1357.07	3.70	66.67	17.187	5.728	384,56
6,5	2.401	2.304	1467.14	3.35	75.81	16.762	4.055	441,94
Spesifikasi	-	-	Min 800	2.0 - 4.0	Min 65	Min 15	3.0 - 5.0	-

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Untuk menentukan kadar aspal yang sesuai dengan parameter yang telah diuji, data tersebut diplot pada grafik yang menunjukkan hubungan antara keduanya. Hal ini dilakukan berdasarkan hasil yang telah diperoleh sebelumnya. Berikut ini grafik-grafik yang ada:

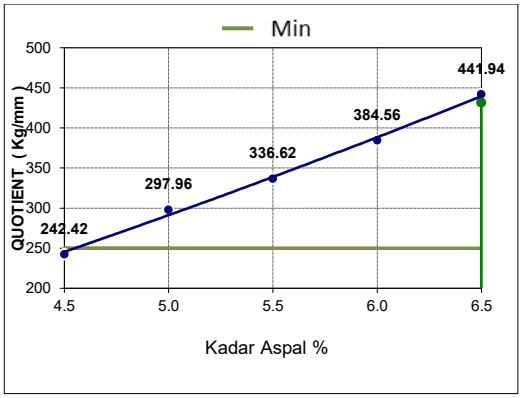


Gambar 3 Grafik Density Kadar Aspal Normal dan Grafik VMA Kadar Aspal Normal



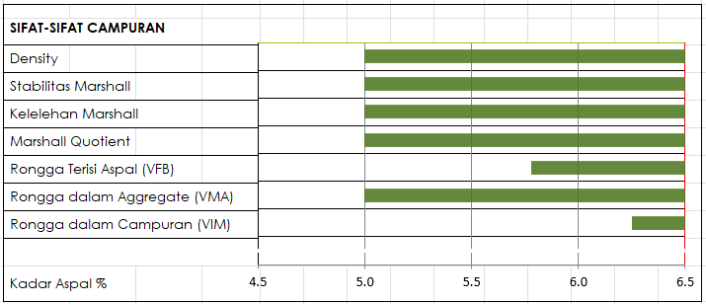
Gambar 4 Grafik VIM Kadar Aspal Normal dan Grafik VFB Kadar Aspal Normal

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)



Gambar 6. Grafik Nilai Marshall Quotient
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Berdasarkan hasil pengujian pada rentang kadar aspal 4,5%-6,5%, kadar aspal 6,5% dipilih sebagai kadar aspal terpilih untuk penelitian lanjutan. Pemilihan kadar aspal 6,5% didasarkan pada hasil pengujian Marshall, dimana seluruh parameter yang memiliki batas persyaratan, yaitu VIM, VMA, VFB stabilitas, dan flow, berada pada dalam rentang spesifikasi yang ditetapkan.



Gambar 7. Bar-Chart Kadar Aspal Terpilih Berdasarkan Rentang Kadar Aspal Yang Diuji
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Penentuan Kadar Styrofoam Terpilih Pada Rentang Variasi 0%, 2%, 4%, 6%

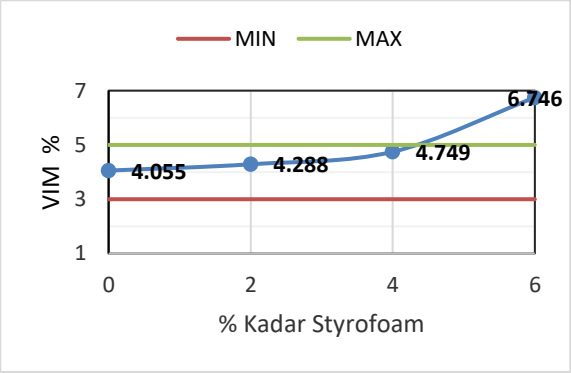
Pengujian campuran dengan bahan tambah Styrofoam dilakukan menggunakan kadar Styrofoam sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap massa aspal pada kadar aspal terpilih sebesar 6,50%. Variasi 0% digunakan sebagai campuran kontrol, sedangkan variasi 2%, 4%, dan 6% merupakan campuran dengan penambahan limbah styrofoam. Pemilihan variasi kadar Styrofoam dilakukan dengan mempertimbangkan pemenuhan parameter Marshall yang memiliki batas persyaratan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 serta perubahan nilai karakteristik Marshall yang dihasilkan. Berdasarkan hasil pengujian, kadar Styrofoam 2% dan 4% memenuhi seluruh parameter Marshall yang memiliki batas persyaratan, sedangkan kadar 6% tidak memenuhi persyaratan VIM dan flow. Selanjutnya, kadar Styrofoam 4% dipilih sebagai variasi terpilih karena menghasilkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan kadar 2%, yaitu 1.313,544 kg dibandingkan 904,716 kg, dengan seluruh parameter Marshall yang dipersyaratkan tetap memenuhi spesifikasi.

Pemenuhan persyaratan Marshall pada setiap variasi kadar Styrofoam dalam penelitian ini dievaluasi berdasarkan nilai rata-rata dari tiga benda uji, sedangkan data masing-masing

benda uji tetap disajikan untuk menunjukkan sebaran hasil pengujian.

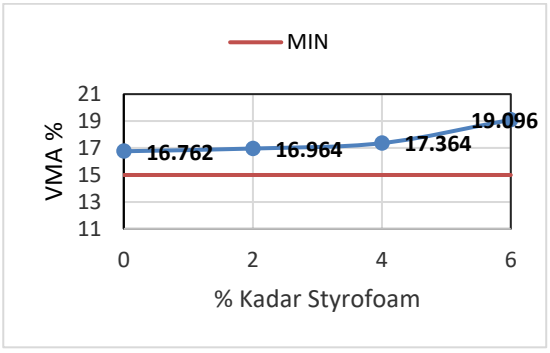
Berdasarkan data masing-masing benda uji pada Tabel 6, terdapat variasi nilai antar sampel pada setiap kadar Styrofoam. Pada kadar 4%, sampel pertama memiliki nilai VIM sebesar 5,66% dan nilai Flow sebesar 4,01 mm, sedangkan sampel kedua memiliki nilai flow sebesar 4,19 mm. Namun, berdasarkan hasil rata-rata tiga benda uji, nilai VIM sebesar 4,749% dan flow sebesar 3,835 mm masih berada dalam rentang spesifikasi yang ditetapkan. Oleh karena itu, kriteria kandungan 4% dievaluasi dalam penelitian ini dengan merata-ratakan hasil pengujian dari tiga sampel.

Campuran aspal terpilih dengan kadar Styrofoam 0% memiliki nilai VIM sebesar 4,055, yang kemudian meningkat menjadi 4,288, 4,749, dan 6,746% seiring dengan bertambahnya kadar limbah Styrofoam. Peningkatan ini menunjukkan bahwa rongga udara dalam campuran dipengaruhi oleh penambahan Styrofoam. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2), kisaran nilai VIM yang direkomendasikan adalah 3–5%. Dengan demikian, variasi pada kadar 2% dan 4% masih dapat diterima, namun variasi pada kadar 6% terlalu tinggi dan tidak memenuhi standar.



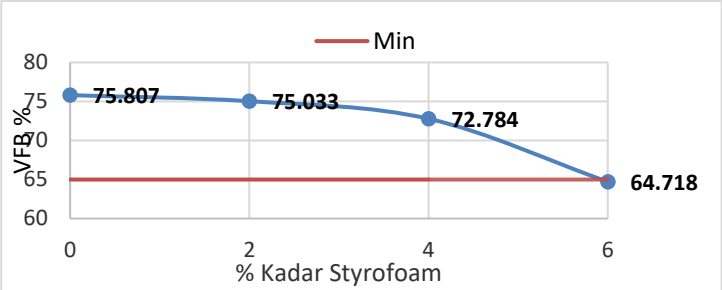
Gambar 8. Grafik Hubungan VIM dengan Kadar Limbah Styrofoam
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Nilai VMA mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar limbah Styrofoam, yaitu dari 16,76% pada campuran normal tanpa styrofoam (0%) menjadi 16,964% (2%), 17,364% (4%), dan 19,096% (6%). Peningkatan ini sejalan dengan meningkatnya nilai VIM, yang menunjukkan bahwa penambahan Styrofoam memengaruhi rongga antar agregat dalam campuran.



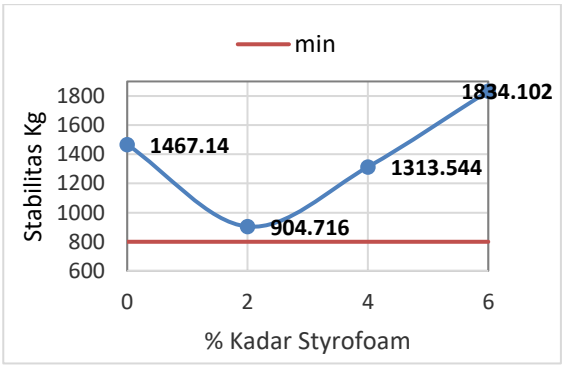
Gambar 9. Grafik Hubungan VMA dengan Kadar Limbah Styrofoam
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Berbeda dengan VIM dan VMA, nilai VFB menurun dari 75,81% pada kontrol menjadi 75,033% (2%), 72,784% (4%), dan 64,718% (6%). Penurunan VFB konsisten dengan meningkatnya rongga campuran; semakin besar volume rongga yang tidak terisi aspal, semakin kecil proporsi rongga agregat yang terisi pengikat. Data penelitian ini tidak mengukur volatilitas atau perubahan kimia Styrofoam, sehingga mekanisme molekuler tidak disimpulkan dari hasil Marshall saja. Kecenderungan ini perlu dibaca bersama metode kering, suhu pencampuran, dan perubahan struktur rongga campuran (Ramadan et al., 2020; Nizamuddin et al., 2021).



Gambar 10. Grafik Hubungan VFB dengan Kadar Limbah Styrofoam
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

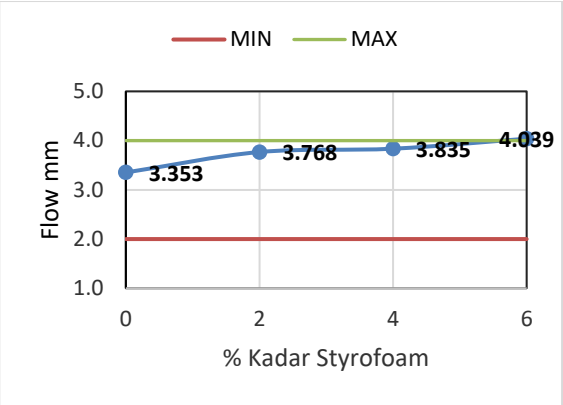
Nilai stabilitas menunjukkan respons tidak linier. Campuran kontrol menghasilkan 1.467,14 kg; nilai turun menjadi 904,716 kg pada 2%, kemudian meningkat menjadi 1.313,544 kg pada 4% dan 1.834,102 kg pada 6%. Karena 6% tidak memenuhi VIM, VFB, dan flow, tingginya stabilitas pada kadar tersebut tidak dapat dijadikan dasar pemilihan tunggal. Kadar 4% dipilih di antara variasi dengan Styrofoam karena memenuhi seluruh parameter dan memiliki stabilitas lebih tinggi daripada 2%, tetapi stabilitasnya masih di bawah campuran kontrol. Pola ini menegaskan perlunya menilai parameter Marshall sebagai satu kesatuan, bukan berdasarkan stabilitas saja, sebagaimana variasi respons yang juga dilaporkan pada penelitian AC-WC berbasis Styrofoam (Amiruddin et al., 2023; Fahira et al., 2023; Kaya, 2023).



Gambar 11. Grafik Hubungan Stabilitas dengan Kadar Limbah Styrofoam
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

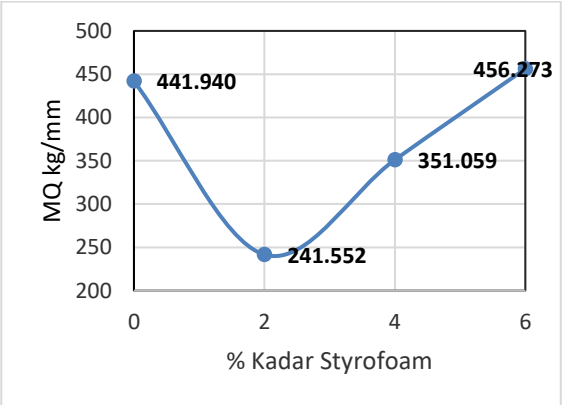
Nilai flow meningkat seiring bertambahnya kadar limbah Styrofoam, yaitu dari 3,35 mm (0%) menjadi 3,77 mm (2%), 3,84 mm (4%), dan 4,04 mm (6%), dapat dilihat pada Gambar

12. Peningkatan nilai flow menunjukkan adanya perubahan respons deformasi campuran terhadap pembebanan seiring bertambahnya kadar styrofoam.



Gambar 12. Grafik Hubungan Flow dengan Kadar Limbah Styrofoam
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Persentase polistirena yang lebih tinggi menghasilkan nilai Marshall Quotient (MQ) yang berbeda. Nilai MQ pada campuran kontrol (0%) adalah 441,940 kg/mm, namun angka ini turun menjadi 241,552 kg/mm pada penggunaan Styrofoam sebesar 2%. Selanjutnya, nilai MQ meningkat menjadi 351,059 kg/mm pada konsentrasi 4% dan 456,273 kg/mm pada kadar 6%. Perubahan nilai MQ ini mengindikasikan adanya hubungan antara flow (lelehan) dan stabilitas pada berbagai varian campuran. Penurunan nilai MQ pada kadar 2% menunjukkan bahwa peningkatan flow lebih besar dibandingkan perubahan stabilitas, sedangkan pada kadar 4% dan 6%, terlihat bahwa nilai stabilitas lebih dominan dibandingkan nilai flow.



Gambar 13. Grafik Hubungan MQ dengan Kadar Limbah Styrofoam
Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

Kombinasi AC-WC diuji menggunakan parameter Marshall yang disyaratkan, yang meliputi stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan MQ, sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2). Nilai Marshall Quotient (MQ) digunakan sebagai parameter hasil perhitungan untuk melihat hubungan antara stabilitas dan flow, namun tidak digunakan sebagai dasar penentuan pemenuhan persyaratan karena tidak tercantum sebagai batas spesifikasi untuk campuran Laston Lapis Aus (AC-WC). Hasil pengujian menunjukkan bahwa

pada kadar styrofoam 2%, 4%, dan 6% terdapat perbedaan pencapaian terhadap parameter Marshall yang dipersyaratkan. Pada kadar 4%, nilai VIM, VMA, VFB, stabilitas dan flow berada dalam rentang persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Sementara itu, pada kadar 6%, nilai VIM sebesar 6,746%, VFB sebesar 64,718%, dan flow sebesar 4,04 mm berada di luar batas persyaratan. Dengan demikian, berdasarkan parameter Marshall yang dipersyaratkan, kadar styrofoam 4% merupakan variasi yang memenuhi persyaratan campuran AC-WC pada penelitian ini.

Tabel 10. Hasil Pengujian dan Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik Marshall pada Variasi Kadar Limbah Styrofoam

Kadar Styrofoam (% Terhadap Berat Aspal)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	MQ (kg/mm)	Memenuhi Spesifikasi
0%	1.467,14	3,35	4,055	16,76	75,81	441,94	Ya
2%	904,716	3,768	4,288	16,964	75.033	241.552	Ya
4%	1.313,544	3,835	4,749	17,364	72,784	351,059	Ya
6%	1.834,102	4,039	6,746	19,096	64,718	456,273	Tidak

Sumber: Analisis Data Penulis (2026)

KESIMPULAN

Pengujian Marshall menunjukkan bahwa kadar Styrofoam 2% dan 4% pada kadar aspal 6,50% memenuhi parameter stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan MQ yang dipersyaratkan, sedangkan kadar 6% tidak memenuhi VIM, VFB, dan flow. Kadar 4% menjadi variasi Styrofoam terpilih karena stabilitasnya lebih tinggi daripada kadar 2% dan seluruh parameternya tetap memenuhi persyaratan. Namun, stabilitas 4% sebesar 1.313,54 kg masih lebih rendah daripada campuran kontrol 1.467,14 kg, sehingga temuan tidak mendukung klaim bahwa penambahan Styrofoam selalu meningkatkan kinerja AC-WC.

Implikasinya, pemanfaatan Styrofoam perlu ditentukan berdasarkan kombinasi parameter Marshall dan kondisi material, bukan satu parameter tunggal. Generalisasi dibatasi oleh penggunaan agregat lokal, metode kering, kadar aspal terpilih, dan pengujian laboratorium. Penelitian lanjutan perlu melaporkan variasi antar benda uji serta menilai durabilitas, ketahanan kelembapan, penuaan, deformasi permanen, dan kinerja lapangan sebelum material direkomendasikan untuk penerapan yang lebih luas.

Setelah menguji rentang kadar 4,5% hingga 6,5%, peneliti menetapkan konsentrasi aspal sebesar 6,50% untuk penelitian selanjutnya. Uji Marshall menunjukkan bahwa sifat-sifat Marshall berubah seiring dengan variasi persentase limbah Styrofoam yang ditambahkan ke dalam campuran AC-WC, yaitu pada rentang 2% hingga 6%.

Hasil yang diperoleh pada konsentrasi polistirena 2% adalah sebagai berikut: VIM = 4,288%, VMA = 16,964%, VFB = 75,033%, stabilitas = 904,716 kg, flow = 3,768 mm, dan MQ = 241,552 kg/mm. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2), seluruh parameter tersebut memenuhi standar yang ditetapkan. Nilai MQ tetap dilaporkan sebagai hasil pengujian, digunakan sebagai parameter hasil perhitungan untuk melihat hubungan antara stabilitas dan flow, namun tidak digunakan sebagai dasar penentuan pemenuhan persyaratan karena tidak tercantum sebagai batas spesifikasi untuk campuran

Laston Lapis Aus (AC-WC).

Dengan 4% polistirena, diperoleh nilai-nilai berikut: VIM=4,749%, VMA=17,364%, VFB=72,784%, stabilitas=1.313,544 kg, flow=3,835 mm, dan MQ=351,059 kg/mm. Berdasarkan nilai rata-rata tiga benda uji, seluruh parameter Marshall yang memiliki batas persyaratan memenuhi spesifikasi. Variasi 4% dipilih sebagai variasi Styrofoam terpilih karena menghasilkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan variasi 2%, yaitu 1.313,544 kg dibandingkan 904,716 kg, dengan tetap memenuhi seluruh parameter Marshall yang dipersyaratkan.

Pada kadar Styrofoam 6%, diperoleh nilai stabilitas sebesar 1.834,102 kg, flow sebesar 4,039 mm, VIM sebesar 6,746%, VMA sebesar 19,096%, VFB sebesar 64,718%, dan MQ sebesar 456,273 kg/mm. Meskipun nilai stabilitas dan MQ meningkat, nilai VIM, VFB dan flow tidak memenuhi batas persyaratan yang ditetapkan untuk campuran AC-WC.

Dengan demikian, berdasarkan variasi kadar Styrofoam yang diuji, kadar 4% dipilih sebagai variasi Styrofoam terpilih dalam penelitian ini karena memberikan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan kadar 2% dan tetap memenuhi seluruh parameter Marshall yang memiliki batas persyaratan, sedangkan kadar 6% tidak memenuhi persyaratan VIM, VFB dan flow. Pemilihan tersebut berlaku pada kondisi material, kadar aspal terpilih, dan metode pencampuran yang digunakan dalam penelitian ini.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Chrisye P. Tinungki: konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, pelaksanaan eksperimen, pengumpulan data, analisis data, penyusun manuskrip, dan revisi manuskrip. Kontribusi berikut ini diberikan oleh Mario Marthen Luther Moningka dan Rilya Rumbayan: supervisi penelitian, validasi hasil, masukan ilmiah, serta peninjauan dan revisi naskah. Setelah meninjau versi akhir artikel, seluruh penulis memberikan persetujuan mereka.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa, memperbaiki tata bahasa, dan menyempurnakan struktur penulisan. AI generatif tidak digunakan untuk menghasilkan, memanipulasi, atau menganalisis data penelitian. Setelah membaca dan memeriksa ulang keseluruhan manuskrip, penulis telah memberikan persetujuannya. Tanggung jawab atas kebenaran, keaslian, dan bentuk akhir naskah sepenuhnya berada di tangan penulis.

REFERENSI

Akter, R., & Raja, R. M. (2022). Effectiveness evaluation of shredded waste expanded polystyrene on the properties of binder and asphalt concrete. *Advances in Civil Engineering*, *2022*(1), 7429188.

Al-Haydari, I. S. J., & Masued, G. G. (2017). Benefit of Using Expanded Polystyrene Packaging Material To Improve Pavement Mixture Properties. Applied Research Journal, 3(11), 332–342.

Amiruddin, Filantropie, N. A., Ramadhani, S. L., & Artini, S. R. (2023). The usage of Styrofoam waste as the additional of Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) with mixing temperature variation. PILAR, 18(1), 1–7. https://doi.org/10.53893/pilar.v18i1.5620

Daryaee, D., Habibpour, M., Gulzar, S., & Underwood, B. S. (2021). Combined effect of waste polymer and rejuvenator on performance properties of reclaimed asphalt binder. Construction and Building Materials, 268, 121059. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121059

Delani, M. N., & Patriotika, P. (2025). Pengaruh Penambahan Limbah Styrofoam Terhadap Benda Uji pada AC-WC Melalui Pengujian Marshall. Menara: Jurnal Teknik Sipil, 21(1), 43–51. https://doi.org/10.21009/jmenara.v21i1.55499

Fahira, E., Syarwan, S., & Riyadhsyah, T. (2023). Pengaruh substitusi limbah plastik Styrofoam terhadap parameter Marshall dan durabilitas beton aspal AC-WC. Jurnal Sipil Sains Terapan, 6(1).

Fitriansyah, F., Azwansyah, H., & Mayuni, S. (2024). Effect of Mixing Temperature on the Utilization of Styrofoam Waste As an Additive in Asphalt Concrete – Wearing Course (Ac-Wc). Jurnal Teknik Sipil, 24(3), 1173. https://doi.org/10.26418/jts.v24i3.82638

Kaya, O. (2023). Experimental investigation of usability of modified asphalt binder with waste expanded polystyrene (EPS). Journal of Innovative Transportation, 4(1), 9–16. https://doi.org/10.53635/jit.1273699

Lebang, J. R., Rachman, R., & Alpius. (2022). Pengaruh Penambahan Limbah Styrofoam Terhadap Karakteristik Campuran AC-WC. Paulus Civil Engineering Journal, 4(2), 289–297. https://doi.org/10.52722/pcej.v4i2.458

Nciri, N., Shin, T., & Cho, N. (2020). Towards the use of waste expanded polystyrene as potential modifier for flexible road pavements. Materials Today: Proceedings, 24(2), 763–771. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.384

Nizamuddin, S., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review. Polymers, 13(19), 3242. https://doi.org/10.3390/polym13193242

Oriaje, A. T., Dahunsi, B. I. O., & Adeyemo, K. A. (2022). Development of melted expanded polystyrene as bitumen modifier for pavement construction. Journal of Engineering Studies and Research, 28(4). https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.010

Paembonan, F., Alpius, & Kamba, C. (2022). Pengaruh Styrofoam Bekas pada Campuran AC-WC Menggunakan Batu Sungai Teik Toraja Utara. Paulus Civil Engineering Journal, 4(2), 272–279. https://doi.org/10.52722/pcej.v4i2.456

Permasi, S. D., Alpius, & Radjawane, L. E. (2022). Pengaruh Penambahan Styrofoam pada Campuran AC-WC Menggunakan Batu Sungai Pattunuang Maros. Paulus Civil Engineering Journal, 4(4), 666–675. https://doi.org/10.52722/pcej.v4i4.552

Putri, E. E., & Dwinanda, A. (2018). The effect of Styrofoam addition into HRS-Base on Marshall characteristics. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 8(5), 2182–2188. https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.5.3944

Ramadan, K. Z., Al-Khateeb, G. G., & Taamneh, M. M. (2020). Mechanical properties of styrofoam-modified asphalt binders. International Journal of Pavement Research and

Technology, 13, 205–211. https://doi.org/10.1007/s42947-019-0102-4

Spesifikasi Umum Bina Marga. (2018). Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). Ministry of Public Works and Housing, (Oktober), 1036.

Sulianti, I., Ibrahim, I., Subrianto, A., Monita, A., & Medici, M. (2019). Karakteristik Marshall Pada Campuran Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) Dengan Penambahan Styrofoam. Forum Mekanika, 8(2), 51–62. https://doi.org/10.33322/forummekanika.v8i2.653

Sulong, N. H. R., Mustapa, S. A. S., & Rashid, M. K. A. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. Journal of Applied Polymer Science, 136(20), 47529. https://doi.org/10.1002/app.47529

Yıldız, K., Kınacı, H., & Atakan, M. (2021). Modification of asphalt binder with waste expanded polystyrene (EPS) foam. Celal Bayar University Journal of Science, 17(3), 245–252. https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.885696