



Analisis Pengaruh Substitusi Styrofoam pada Campuran *Asphalt Concrete-Base* terhadap Karakteristik *Marshall*

Gilang Anugrah¹, Lizar²

^{1,2} Prodi Teknik Perancangan Jalan dan Jembatan, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bengkalis, Jl. Bathin Alam, Desa Sungai Alam, Kecamatan Bengkalis, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau, 28711, Indonesia
gilanganugrah741@gmail.com, lizar@polbeng.ac.id

Abstrak

Pengembangan infrastruktur jalan di Indonesia menghadapi tantangan ganda berupa tingginya biaya aspal minyak dan meningkatnya volume limbah *styrofoam* yang sulit terurai secara alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas limbah *styrofoam* sebagai bahan substitusi sebagian aspal pada campuran *Asphalt Concrete-Base* (AC-Base) dengan variasi kadar 3% hingga 12%. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium yang merujuk pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Tahapan pengujian mencakup karakterisasi material dasar (agregat Tanjung Balai Karimun dan aspal Pen 60/70), penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO), dan pengujian *Marshall* pada 48 benda uji yang diberikan pemadatan 112 tumbukan per lapis untuk simulasi beban lalu lintas berat. Hasil penelitian menetapkan KAO sebesar 5% sebagai *baseline* performa. Substitusi *styrofoam* secara signifikan memengaruhi karakteristik *reologi binder*, di mana stabilitas mencapai puncak pada kadar 9% sebesar 2423,4 kg. Namun, peningkatan kadar *styrofoam* memicu kenaikan dramatis pada nilai *Void in Mix* (VIM) dan penurunan *Void Filled with Asphalt* (VFA) karena meningkatnya *viskositas binder* yang menghambat kemudahan pengerjaan (*workability*). Analisis teknis menunjukkan bahwa hanya substitusi 3% yang mampu memenuhi seluruh kriteria Spesifikasi Bina Marga 2018, terutama pada parameter durabilitas volumetrik. Kesimpulannya, substitusi *styrofoam* sebesar 3% direkomendasikan sebagai dosis efektif untuk meningkatkan stabilitas struktur perkerasan AC-Base sekaligus memberikan solusi pengurangan konsumsi bitumen berbasis minyak bumi yang berdampak pada keberlanjutan lingkungan.

Kata Kunci: Styrofoam, AC-Base, Karakteristik Marshall, KAO, Bina Marga 2018.

1. Pendahuluan

Infrastruktur jalan merupakan salah satu komponen utama dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, pemerataan pembangunan, serta mobilitas masyarakat di Indonesia. Meningkatnya volume lalu lintas dan beban kendaraan berat menyebabkan kebutuhan terhadap perkerasan jalan yang memiliki kinerja tinggi semakin meningkat. Salah satu lapisan penting pada struktur perkerasan lentur adalah *Asphalt Concrete Base* (AC-Base), yang berfungsi sebagai lapisan struktural untuk menahan dan mendistribusikan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya. Oleh karena itu, campuran AC-Base dituntut memiliki karakteristik mekanis yang baik agar mampu memberikan stabilitas, kekuatan, dan umur layanan yang optimal. Namun demikian, penggunaan material konvensional dalam campuran aspal masih menghadapi berbagai kendala, seperti tingginya biaya material, keterbatasan ketersediaan agregat berkualitas, serta dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi dan eksploitasi sumber daya alam. Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan material alternatif yang tidak hanya mampu meningkatkan kinerja campuran aspal, tetapi juga mendukung konsep pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Salah satu material yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan alternatif adalah limbah *styrofoam* atau *expanded polystyrene* (EPS). *Styrofoam* atau *polystyrene* merupakan material polimer sintetis yang sulit terurai secara alami sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran (Mukminah, 2019). Material sintetis yang memiliki sifat ringan, tahan air, namun sangat sulit terurai secara alami sehingga menjadi salah satu penyumbang pencemaran lingkungan. Permasalahan limbah *styrofoam* di Indonesia terus meningkat seiring dengan tingginya penggunaan material tersebut pada sektor kemasan maupun konstruksi. (Ardiatma et al., 2025) melaporkan bahwa Indonesia menghasilkan sekitar 648 juta limbah *styrofoam* setiap hari, sementara material tersebut membutuhkan waktu sekitar 500 tahun untuk terdegradasi secara alami. Kondisi ini menunjukkan bahwa limbah *styrofoam* memerlukan strategi pengelolaan yang lebih efektif agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan limbah tersebut sebagai material rekayasa pada bidang konstruksi jalan.

Pemanfaatan limbah *styrofoam* dalam campuran aspal dinilai mampu memberikan dua manfaat sekaligus, yaitu mengurangi akumulasi limbah yang mencemari lingkungan serta meningkatkan kualitas campuran perkerasan jalan. Secara material, *styrofoam* memiliki sifat termoplastik yang memungkinkan material ini melunak pada suhu tinggi dan berinteraksi dengan aspal sebagai bahan pengikat. Karakteristik tersebut membuka peluang

pemanfaatannya sebagai bahan modifikasi pada campuran aspal untuk meningkatkan sifat mekanis campuran. Meskipun demikian, pengaruh penambahan styrofoam terhadap karakteristik Marshall masih bergantung pada kadar penggunaan, jenis campuran, serta metode pencampuran yang diterapkan. Oleh sebab itu, penelitian mengenai pemanfaatan styrofoam pada campuran aspal masih perlu dikembangkan untuk memperoleh komposisi yang mampu memberikan kinerja optimum.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan limbah styrofoam sebagai bahan tambah pada campuran aspal beton. (Sastra & Riyanto, 2025) serta (Febriani et al., 2023) melaporkan bahwa penambahan styrofoam pada campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) mampu meningkatkan nilai stabilitas Marshall, meskipun pada kadar tertentu menyebabkan penurunan nilai *flow*. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Rahmat Tisnawan, Rizki Ramadhan Husaini, Muhammad Yazid, 2025), (Lebang & Rachman, Rais Rachman, 2022) serta (Maya Nabila Delani, 2025), yang menunjukkan bahwa penggunaan styrofoam pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dapat meningkatkan stabilitas hingga batas kadar tertentu. Temuan-temuan tersebut mengindikasikan bahwa styrofoam memiliki potensi sebagai material modifikasi campuran aspal. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih menerapkan metode penambahan (*addition*), yaitu menambahkan styrofoam tanpa mengurangi jumlah aspal yang digunakan.

Penelitian ini menerapkan metode substitusi (*substitution*), yaitu menggantikan sebagian kadar aspal dengan styrofoam sehingga proporsi total bahan pengikat tetap dipertahankan. Pendekatan ini didasarkan pada hipotesis bahwa styrofoam tidak hanya berfungsi sebagai bahan tambahan, tetapi juga dapat berperan sebagai bagian dari matriks pengikat dalam campuran aspal. Dengan demikian, karakteristik campuran yang dihasilkan berpotensi berbeda dibandingkan metode *addition*. Selain itu, penelitian mengenai penerapan metode substitusi pada campuran Asphalt Concrete Base (AC-Base) masih relatif terbatas, padahal lapisan AC-Base merupakan lapisan struktural utama yang sangat berpengaruh terhadap kemampuan perkerasan dalam menerima beban lalu lintas. Keterbatasan penelitian tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) yang perlu dikaji lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kadar limbah styrofoam sebagai substitusi sebagian aspal terhadap karakteristik Marshall pada campuran Asphalt Concrete Base (AC-Base) melalui pengujian laboratorium secara konvensional. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh penggunaan styrofoam terhadap parameter Marshall serta menentukan komposisi yang memberikan kinerja campuran terbaik. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih ekonomis, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, sekaligus menjadi referensi ilmiah dalam pemanfaatan limbah styrofoam sebagai material alternatif pada campuran aspal beton, khususnya untuk lapisan AC-Base.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara deskriptif eksperimental dengan memanfaatkan fasilitas Laboratorium Jalan Raya Politeknik Negeri Bengkalis. Material yang digunakan meliputi aspal penetrasi 60/70 serta agregat kasar, sedang, dan halus yang berasal dari Tanjung Balai Karimun. Selain itu, semen digunakan sebagai bahan pengisi (*filler*) untuk menjamin stabilitas *filler-binder mastic*. Tahapan penelitian dimulai dari pengujian karakteristik fisik material guna memastikan kepatuhan terhadap standar teknis nasional.

Total sebanyak 48 benda uji diproduksi, yang terbagi atas 15 sampel untuk penentuan Kadar Aspal Rencana (KAR) awal dan 33 sampel untuk analisis KAR serta modifikasi substitusi polimer. Mengingat AC-Base dirancang untuk menahan beban struktural yang berat, setiap lapisan benda uji diberikan energi pemadatan sebanyak 112 kali tumbukan. Penentuan kadar aspal rencana (Pb) menggunakan pendekatan empiris yang mempertimbangkan komposisi agregat gabungan melalui persamaan matematis. Nilai Pb dihitung dengan menjumlahkan hasil perkalian koefisien 0,035 untuk persentase agregat kasar yang tertahan ayakan nomor 8, koefisien 0,045 untuk agregat halus yang lolos ayakan nomor 8, serta koefisien 0,18 untuk bahan pengisi yang lolos ayakan nomor 200, ditambah dengan konstanta sebesar 0,5 untuk jenis campuran *Asphalt Concrete*. Alur penelitian berjalan secara sistematis mulai dari penentuan gradasi gabungan, pengujian Marshall standar untuk menetapkan KAO 5%, hingga evaluasi mendalam terhadap aspal modifikasi dengan variasi kadar substitusi limbah *styrofoam*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Material

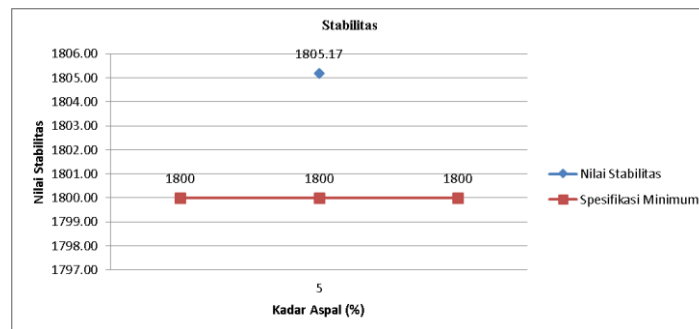
Evaluasi laboratorium menunjukkan bahwa seluruh material dasar telah memenuhi kriteria ketat Spesifikasi Bina Marga 2018. Agregat kasar menunjukkan kekuatan mekanis yang sangat baik dengan nilai keausan Los Angeles sebesar 16,74%, jauh lebih rendah dari batas maksimum 40% yang diizinkan. Rendahnya nilai penyerapan air (0,766%) juga mengindikasikan agregat memiliki porositas rendah yang efisien dalam penggunaan binder. Karakteristik aspal murni juga memenuhi standar, menjamin adhesi yang kuat sebelum dilakukan proses modifikasi reologi dengan polimer.

Tabel 1. Karakteristik Material

Jenis Pengujian	Standar Uji	Hasil Pengujian	Persyaratan
Keausan Agregat (Los Angeles)	SNI 2417:2008	16,74%	Maks. 40%
Penyerapan Air Agregat Kasar	SNI 1969:2016	0,766%	Maks. 3%
Berat Jenis Aspal Pen 60/70	SNI 2441:2011	1,018	Min. 1,0
Titik Lembek Aspal	SNI 2434:2011	48 °C	Min. 48 °C
Berat Jenis Semen (<i>Filler</i>)	SNI 2531:2015	3,08	3,00–3,20

3.2. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Evaluasi terhadap variasi KAR pada rentang 3,5% hingga 5,5% dilakukan untuk memetakan performa volumetrik dan mekanis campuran. Hasil analisis menetapkan bahwa pada kadar aspal 5%, seluruh kriteria Marshall terpenuhi secara optimal, termasuk nilai stabilitas yang mencapai 2104,9 kg serta parameter VMA (16,00%) dan VIM (4,67%) yang berada dalam koridor spesifikasi. Setelah menetapkan KAO 5% sebagai *baseline* performa, evaluasi beralih pada mekanisme substitusi polimer untuk menguji batas elastisitas dan stabilitas campuran AC-Base yang telah dimodifikasi.



Gambar 1. Stabilitas (KAO)

3.3. Analisis Substitusi Styrofoam

Substitusi *styrofoam* pada kadar 3% hingga 12% memicu perubahan signifikan pada performa campuran. Dari sisi mekanis, stabilitas Marshall meningkat secara konsisten hingga mencapai puncaknya pada kadar substitusi 9% dengan nilai 2423,4 kg. Peningkatan ini merupakan hasil dari modifikasi reologi aspal akibat interaksi polistirena yang meningkatkan kekakuan binder. Polimer yang mencair dalam aspal panas membentuk jaringan pengikat yang lebih kokoh, sehingga meningkatkan daya dukung campuran terhadap beban deformasi.

Namun, tinjauan mikromekanis menunjukkan bahwa peningkatan viskositas binder akibat kandungan *styrofoam* yang tinggi berdampak negatif pada karakteristik volumetrik. Seiring bertambahnya polimer, nilai VIM melonjak drastis hingga mencapai 13,11% pada kadar substitusi 12%, sementara nilai VFA menurun tajam. Fenomena ini disebabkan oleh penurunan kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran saat pemadatan; binder yang sangat kental membentuk film binder yang tebal (*binder film thickness*) yang cenderung menjembatani (*bridging*) antar agregat daripada mengisi pori-pori interstitial secara optimal. Hal ini menyebabkan campuran menjadi berpori dan cenderung "getas" atau rapuh. Pada kadar 12%, nilai VIM yang hampir mencapai tiga kali lipat batas maksimum (5%) merusak integritas struktural meskipun memiliki stabilitas yang tinggi.

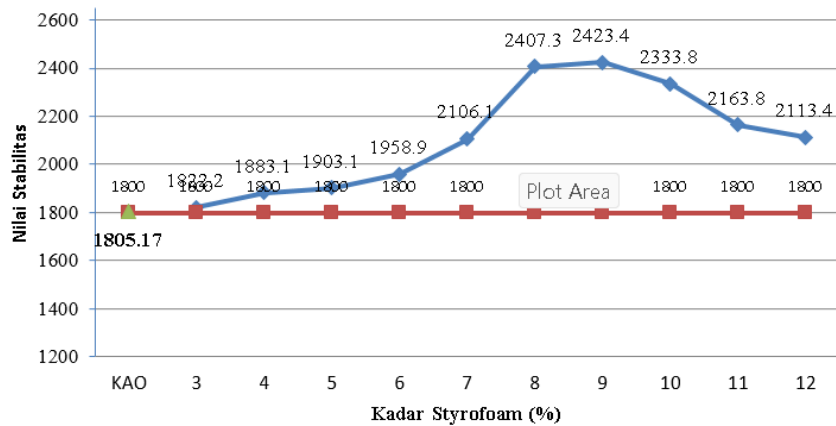
Tabel 2. Rekapitulasi Karakteristik Marshall Campuran Modifikasi Styrofoam

Parameter	Normal	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Stabilitas	1805.2	1822.2	1883.1	1903.1	1958.9	2106.1	2407.3	2423.4	2333.8	2163.8	2113.4
VIM	4.5	4.7	5.6	6.0	7.2	7.8	9.3	10.8	12.4	12.9	13.1
VMA	16.2	15.2	16.7	17.2	18.3	19.0	20.0	21.4	23.0	23.6	23.9
VFA	72.2	70.5	66.6	65.1	60.9	59.5	53.3	49.7	46.0	45.5	45.3
FLOW	3.3	3.4	3.7	3.8	3.8	3.9	4	3.8	3.7	3.1	2.9
MQ	553.6	547.2	508.9	502.7	521.0	541.6	607.0	647.1	635.9	705.1	741.2
Density	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1

Stabilitas

Substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai stabilitas campuran *Asphalt Concrete Base* (AC-Base). Nilai stabilitas pada campuran tanpa substitusi *styrofoam* (KAO) sebesar 1805,17. Kg. Nilai tersebut telah

memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu nilai stabilitas minimum sebesar 1800 kg. Setelah dilakukan substitusi *styrofoam*, nilai stabilitas menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kadar *styrofoam*. Pada kadar *styrofoam* 3%, nilai stabilitas sebesar 1822,2 kg, kemudian meningkat menjadi 1883,1 kg pada kadar 4%, 1903,1 kg pada kadar 5%, 1958,9 kg pada kadar 6%, dan 2106,1 kg pada kadar 7%. Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa penambahan *styrofoam* mampu meningkatkan kekakuan campuran sehingga daya dukung campuran terhadap beban menjadi lebih baik.



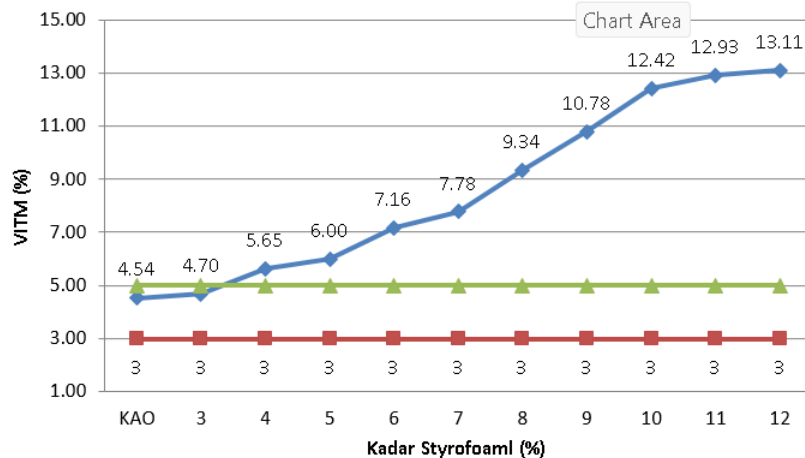
Gambar 2. Grafik Stabilitas substitusi Styrofoam

Nilai stabilitas terus meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada kadar styrofoam 9%, yaitu sebesar 2423,4 kg. Dibandingkan dengan campuran tanpa substitusi *styrofoam*, nilai stabilitas mengalami peningkatan sekitar 34,2%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar tersebut, *styrofoam* mampu berfungsi sebagai bahan substitusi yang meningkatkan kekuatan ikatan dalam campuran beraspal. *Styrofoam* yang merupakan material polimer diduga dapat meningkatkan kekakuan aspal sehingga campuran menjadi lebih stabil terhadap pembebanan.

Namun, setelah kadar *styrofoam* melebihi 9%, nilai stabilitas mulai mengalami penurunan. Pada kadar 10%, nilai stabilitas turun menjadi 2333,8 kg, kemudian menjadi 2163,8 kg pada kadar 11%, dan 2113,4 kg pada kadar 12%. Penurunan ini diduga terjadi karena jumlah *styrofoam* yang terlalu tinggi menyebabkan campuran menjadi semakin kaku sehingga penyelimutan agregat oleh aspal menjadi kurang optimal. Kondisi tersebut mengurangi efektivitas ikatan antara agregat dan aspal, sehingga kemampuan campuran dalam menahan beban mulai menurun. Meskipun demikian, seluruh variasi kadar *styrofoam* yang digunakan masih menghasilkan nilai stabilitas di atas 1800 kg, sehingga seluruh campuran masih memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk lapisan AC-Base. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan nilai stabilitas hingga kadar 9%, sedangkan penambahan styrofoam di atas kadar tersebut menyebabkan nilai stabilitas mengalami penurunan.

Void in Mix

Substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai *Void in Mix* (VIM) pada campuran *Asphalt Concrete Base* (AC-Base). Nilai VIM pada campuran tanpa substitusi *styrofoam* (KAO) sebesar 4,54%, yang telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu berada pada rentang 3–5%. Pada kadar styrofoam 3%, nilai VIM sedikit meningkat menjadi 4,70% dan masih memenuhi persyaratan spesifikasi. Namun, pada kadar styrofoam 4%, nilai VIM meningkat menjadi 5,65%, kemudian terus mengalami peningkatan menjadi 6,00% pada kadar 5%, 7,16% pada kadar 6%, 7,78% pada kadar 7%, 9,34% pada kadar 8%, 10,78% pada kadar 9%, 12,42% pada kadar 10%, 12,93% pada kadar 11%, dan mencapai 13,11% pada kadar 12%.

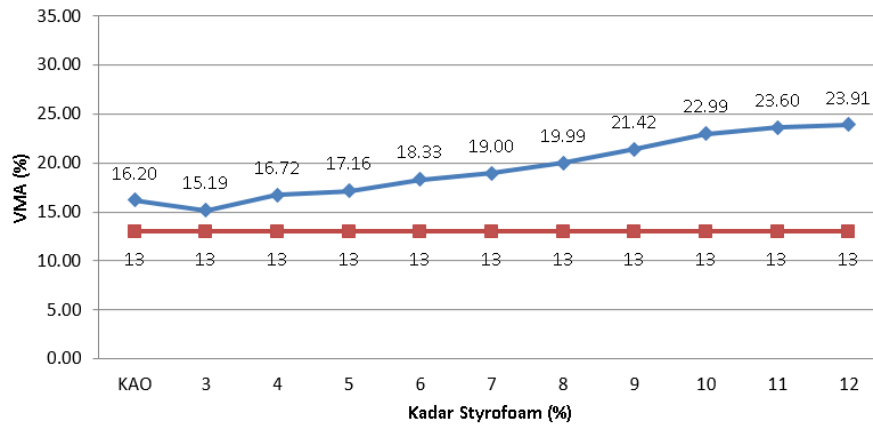


Gambar 3. VIM Substitusi Styrofoam

Peningkatan nilai VIM menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar *styrofoam* yang digunakan, semakin besar volume rongga udara yang terdapat di dalam campuran. Kondisi ini diduga terjadi karena penambahan *styrofoam* menyebabkan berkurangnya kemampuan aspal dalam mengisi rongga antar agregat secara optimal, sehingga jumlah rongga udara di dalam campuran meningkat. Semakin besar nilai VIM menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih berpori dan memiliki rongga udara yang lebih banyak. Berdasarkan hasil pengujian, hanya campuran KAO (0%) dan kadar styrofoam 3% yang masih memenuhi persyaratan VIM menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu berada pada rentang 3–5%. Sementara itu, pada kadar styrofoam 4% hingga 12%, nilai VIM telah melebihi batas maksimum yang dipersyaratkan sehingga tidak memenuhi spesifikasi. Nilai VIM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran lebih mudah ditembus oleh air dan udara. Kondisi tersebut berpotensi mempercepat proses oksidasi aspal, mengurangi daya lekat antara aspal dan agregat, serta menurunkan keawetan (durabilitas) perkerasan jalan. Oleh karena itu, meskipun penambahan *styrofoam* mampu meningkatkan nilai stabilitas pada kadar tertentu, peningkatan nilai VIM yang cukup besar menunjukkan bahwa penggunaan styrofoam dalam kadar tinggi perlu dikendalikan agar karakteristik campuran tetap memenuhi spesifikasi. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa substitusi styrofoam memberikan pengaruh terhadap nilai VIM campuran AC-Base, yaitu semakin tinggi kadar styrofoam maka nilai VIM cenderung meningkat. Variasi kadar styrofoam yang memenuhi persyaratan VIM hanya terdapat pada KAO (0%) dan kadar 3%, sedangkan kadar 4% hingga 12% tidak memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Void Mineral Aggregate

Substitusi styrofoam memberikan pengaruh terhadap nilai *Void in Mineral Aggregate* (VMA) pada campuran *Asphalt Concrete Base* (AC-Base). Nilai VMA pada campuran tanpa substitusi styrofoam (KAO) sebesar 16,20%. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu nilai VMA minimum sebesar 13%. Pada kadar styrofoam 3%, nilai VMA mengalami penurunan menjadi 15,19%. Namun, seiring dengan bertambahnya kadar styrofoam, nilai VMA menunjukkan kecenderungan meningkat secara bertahap, yaitu 16,72% pada kadar 4%, 17,16% pada kadar 5%, 18,33% pada kadar 6%, 19,00% pada kadar 7%, 19,99% pada kadar 8%, 21,42% pada kadar 9%, 22,99% pada kadar 10%, 23,60% pada kadar 11%, dan mencapai 23,91% pada kadar 12%. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar *styrofoam* yang digunakan, semakin besar volume rongga di antara susunan agregat dalam campuran. Kondisi ini diduga terjadi karena sifat styrofoam sebagai material polimer menyebabkan perubahan struktur internal campuran sehingga ruang kosong di antara agregat menjadi lebih besar. Akibatnya, nilai VMA meningkat seiring bertambahnya kadar substitusi styrofoam.

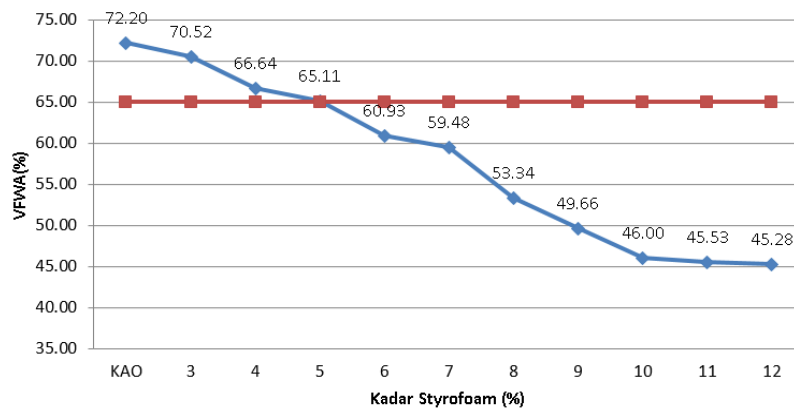


Gambar 4. Grafik VMA Substitusi Styrofoam

Secara keseluruhan, seluruh variasi kadar *styrofoam* menghasilkan nilai VMA yang berada di atas batas minimum spesifikasi, yaitu 13%, sehingga seluruh campuran memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk parameter VMA. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *styrofoam* tidak menyebabkan nilai VMA berada di bawah batas yang dipersyaratkan, meskipun nilai VMA cenderung meningkat pada kadar *styrofoam* yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai VMA campuran AC-Base, yaitu semakin tinggi kadar *styrofoam* maka nilai VMA cenderung meningkat. Meskipun demikian, seluruh variasi kadar *styrofoam* yang digunakan masih memenuhi persyaratan VMA minimum berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Void Filled with Asphalt

Bahwa substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai *Void Filled with Asphalt* (VFA) pada campuran *Asphalt Concrete Base* (AC-Base). Nilai VFA pada campuran tanpa substitusi *styrofoam* (KAO) sebesar 72,20%, yang telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimum 65%. Seiring bertambahnya kadar *styrofoam*, nilai VFA menunjukkan kecenderungan mengalami penurunan. Pada kadar *styrofoam* 3%, nilai VFA sebesar 70,52%, kemudian menurun menjadi 66,64% pada kadar 4%, dan 65,11% pada kadar 5%. Seluruh nilai tersebut masih memenuhi persyaratan spesifikasi karena berada di atas batas minimum 65%.



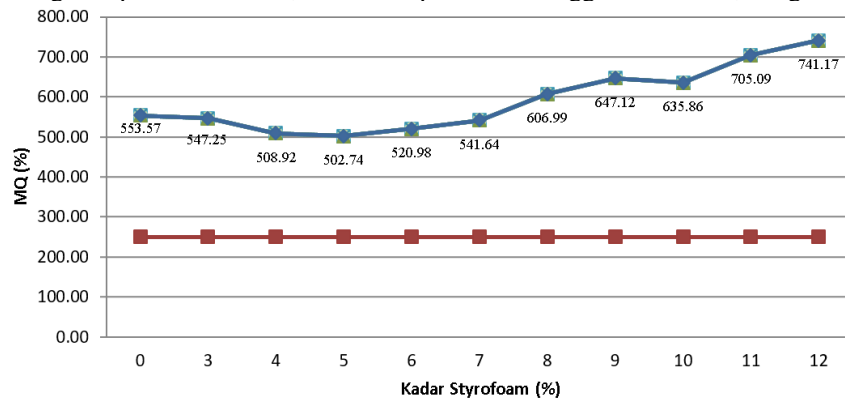
Gambar 5. Grafik VFA Substitusi Styrofoam

Namun, pada kadar *styrofoam* 6%, nilai VFA turun menjadi 60,93%, kemudian kembali menurun menjadi 59,48% pada kadar (7%), 53,34% pada kadar (8%), 49,66% pada kadar (9%), 46,00% pada kadar (10%), 45,53% pada kadar (11%), dan 45,28% pada kadar (12%). Nilai-nilai tersebut berada di bawah batas minimum yang dipersyaratkan, sehingga tidak memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Penurunan nilai VFA menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar *styrofoam* yang digunakan, semakin kecil persentase rongga agregat yang terisi oleh aspal. Kondisi ini diduga terjadi karena keberadaan *styrofoam* menyebabkan perubahan karakteristik campuran sehingga kemampuan aspal dalam mengisi rongga antar agregat menjadi berkurang. Akibatnya, nilai VFA mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar substitusi *styrofoam*. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai VFA campuran AC-Base, yaitu semakin tinggi kadar *styrofoam* maka nilai VFA cenderung menurun. Variasi kadar *styrofoam* yang masih memenuhi persyaratan VFA menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 hanya

terdapat pada kadar 0% (KAO), 3%, 4%, dan 5%, sedangkan kadar 6% hingga 12% tidak lagi memenuhi persyaratan.

Marshall Quotient

Substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai *Marshall Quotient* (MQ) campuran *Asphalt Concrete Base* (AC-Base). Nilai MQ pada campuran tanpa substitusi *styrofoam* (KAO) sebesar 553,57 kg/mm, yang telah memenuhi persyaratan spesifikasi. Pada kadar *styrofoam* 3%, nilai MQ sedikit menurun menjadi 547,25 kg/mm. Nilai MQ terus mengalami penurunan hingga mencapai 508,92 kg/mm pada kadar 4% dan 502,74 kg/mm pada kadar 5%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa pada kadar substitusi rendah, peningkatan nilai *flow* relatif lebih besar dibandingkan peningkatan nilai stabilitas sehingga menyebabkan nilai Marshall Quotient menurun. Setelah kadar *styrofoam* 5%, nilai MQ mulai meningkat secara bertahap, yaitu 520,98 kg/mm pada kadar 6%, 541,64 kg/mm pada kadar 7%, 606,99 kg/mm pada kadar 8%, 647,12 kg/mm pada kadar 9%, 635,86 kg/mm pada kadar 10%, 705,09 kg/mm pada kadar 11%, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 741,17 kg/mm pada kadar 12%.

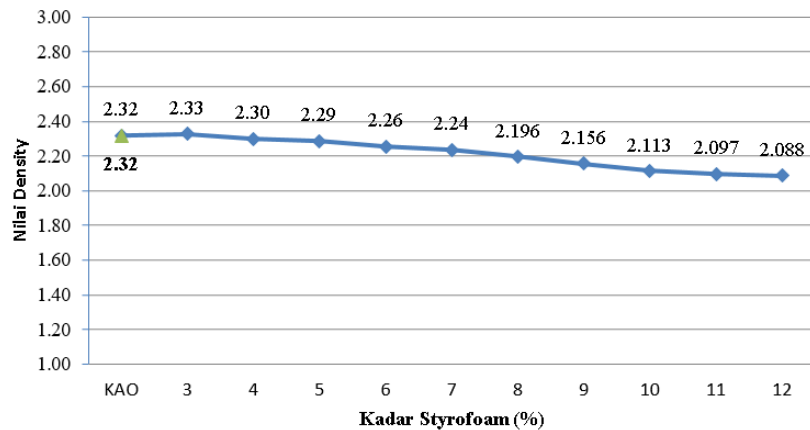


Gambar 6. Grafik MQ Substitusi Styrofoam

Peningkatan nilai MQ pada kadar *styrofoam* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa campuran menjadi semakin kaku. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh sifat *styrofoam* sebagai material polimer yang mampu meningkatkan kekakuan aspal sehingga campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen akibat pembebanan. Akan tetapi, kekakuan yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan campuran menjadi kurang fleksibel dan lebih rentan mengalami retak apabila menerima beban berulang atau perubahan temperatur yang signifikan. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh variasi kadar substitusi *styrofoam* menghasilkan nilai *Marshall Quotient* di atas 250 kg/mm, sehingga seluruh campuran masih memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Namun demikian, penentuan kadar substitusi *styrofoam* yang direkomendasikan tidak hanya didasarkan pada nilai MQ, tetapi juga harus mempertimbangkan parameter Marshall lainnya seperti stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFA. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi *styrofoam* memberikan pengaruh terhadap nilai Marshall Quotient campuran AC-Base. Semakin tinggi kadar *styrofoam* yang digunakan, nilai MQ cenderung meningkat sehingga campuran menjadi lebih kaku. Berdasarkan evaluasi seluruh parameter Marshall, kadar substitusi *styrofoam* sebesar 3% merupakan kadar yang paling direkomendasikan karena merupakan variasi yang masih memenuhi seluruh persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, meskipun nilai MQ tertinggi diperoleh pada kadar 12%.

Density

Nilai *Density* campuran *Asphalt Concrete Base* (AC-Base) menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya kadar substitusi *styrofoam*. Campuran normal pada Kadar Aspal Optimum (KAO) memiliki nilai *density* sebesar 2,32 gr/cm³. Pada substitusi *styrofoam* 3%, nilai *density* meningkat sedikit menjadi 2,33 gr/cm³, kemudian mengalami penurunan secara bertahap menjadi 2,30 gr/cm³ (4%), 2,29 gr/cm³ (5%), 2,26 gr/cm³ (6%), 2,24 gr/cm³ (7%), 2,20 gr/cm³ (8%), 2,16 gr/cm³ (9%), 2,11 gr/cm³ (10%), 2,10 gr/cm³ (11%), dan mencapai nilai terendah sebesar 2,09 gr/cm³ pada substitusi *styrofoam* 12%.



Gambar 7. Grafik Density Substitusi Styrofoam

Penurunan nilai *density* menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar substitusi styrofoam, semakin rendah kepadatan campuran AC-Base. Hal ini disebabkan karena styrofoam memiliki berat jenis yang jauh lebih rendah dibandingkan aspal, sehingga penambahan styrofoam mengurangi berat isi campuran dan meningkatkan volume rongga di dalam campuran. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil pengujian VIM yang meningkat dan VFA yang menurun pada kadar substitusi yang lebih tinggi. Meskipun terjadi sedikit peningkatan density pada substitusi 3%, secara umum penambahan styrofoam menyebabkan campuran menjadi lebih ringan. Oleh karena itu, kadar substitusi 3% merupakan variasi yang paling baik karena masih memiliki nilai density yang mendekati campuran normal (KAO) sekaligus memenuhi seluruh parameter *Marshall*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa seluruh material penyusun campuran Asphalt Concrete Base (AC-Base), yang terdiri atas agregat kasar ukuran $\frac{3}{4}$ inci, agregat halus ukuran $\frac{3}{8}$ inci, agregat halus, filler semen, dan aspal penetrasi 60/70, telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil pengujian karakteristik material menunjukkan bahwa nilai berat jenis, penyerapan agregat, keausan Los Angeles, berat jenis aspal, titik lembek, serta berat jenis filler masih berada dalam rentang spesifikasi yang dipersyaratkan. Dengan demikian, seluruh material dinyatakan layak digunakan sebagai bahan penyusun campuran AC-Base. Berdasarkan hasil pengujian Marshall pada variasi Kadar Aspal Rencana (KAR) sebesar 3,5%; 4%; 4,5%; 5%; dan 5,5%, diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 5%. Penentuan KAO tersebut didasarkan pada evaluasi terhadap seluruh parameter Marshall, yaitu stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), dan Marshall Quotient (MQ), dimana seluruh parameter pada kadar aspal 5% telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Oleh karena itu, kadar aspal tersebut digunakan sebagai campuran kontrol pada pengujian substitusi styrofoam.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan styrofoam sebagai bahan substitusi aspal memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik Marshall dan parameter volumetrik campuran AC-Base. Seiring dengan meningkatnya kadar substitusi styrofoam dari 3% hingga 12%, nilai stabilitas campuran cenderung mengalami peningkatan hingga mencapai nilai maksimum sebesar 2423,40 kg pada kadar substitusi 9%, kemudian mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi. Nilai flow meningkat hingga mencapai 4,0 mm pada substitusi 8%, kemudian menurun pada variasi berikutnya. Selain itu, nilai Marshall Quotient (MQ) menunjukkan kecenderungan meningkat yang mengindikasikan bertambahnya kekakuan campuran, sedangkan nilai VIM dan VMA mengalami peningkatan, sementara nilai VFA mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar substitusi styrofoam. Meskipun beberapa variasi menghasilkan peningkatan stabilitas dan kekakuan campuran, hasil evaluasi terhadap seluruh parameter Marshall menunjukkan bahwa hanya variasi substitusi styrofoam sebesar 3% yang memenuhi seluruh persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Dengan demikian, kadar substitusi 3% merupakan kadar yang paling optimum dan direkomendasikan dalam penelitian ini karena mampu mempertahankan keseimbangan antara stabilitas, fleksibilitas, serta karakteristik volumetrik campuran sehingga tetap memenuhi standar teknis yang berlaku. Temuan ini juga menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah styrofoam dalam jumlah terbatas berpotensi menjadi alternatif bahan substitusi aspal yang lebih ramah lingkungan tanpa mengurangi mutu kinerja campuran AC-Base.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bengkalis atas dukungan fasilitas penelitian. Apresiasi tulus diberikan kepada Ir. Lizar, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, serta tim pengujian laboratorium yang telah membantu kelancaran pengumpulan data riset ini.

Reference

- Ardiatma, D., Ilyas, N. I., Halomoan, N., & Indriyani, Y. M. (2025). *Pemanfaatan Limbah Plastik PS (Polystyrene) Jenis Styrofoam menjadi Paving Block dengan Campuran Silica Fume sebagai Upaya Reduksi Sampah Plastik*. 17(1), 56–72. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol17.iss1.art5>
- Febriani, R., Nurdin, A., Jamal, N., Studi, P., Sipil, T., & Jambi, U. (2023). *LIMBAH STYROFOAM PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE-BINDER COURSE (AC-BC) TERHADAP PENGUJIAN*. 13(02), 133–144. <https://repository.unja.ac.id/50097/>
- Jenderal, D., & Marga, B. (2020). *Spesifikasi umum 2018. Revisi 2*.
- Lebang, J. R., & Rachman, Rais Rachman, A. (2022). *Pengaruh Penambahan Limbah Karakteristik Campuran AC-WC Styrofoam Terhadap*. 4(2), 289–297. <https://doi.org/10.52722/hpa8ed90>
- Maya Nabila Delani, F. P. (2025). *PENGARUH PENAMBAHAN LIMBAH STYROFOAM TERHADAP BENDA UJI PADA AC-WC MELALUI PENGUJIAN MARSHALL THE*. 21(1), 43–51. <https://doi.org/10.21009/jmenara.v21i1.55499>
- Mukminah, I. Al. (2019). *Bahaya Wadah Styrofoam dan Alternatif Penggantinya*. 4(2), 32–34. <https://doi.org/10.24198/farmasetika.v4i2.22589>
- Nasot, M., & B, A. M. (2022). *PENGARUH PENAMBAHAN STYROFOAM TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL PADA LAPISAN ASPAL BETON AC-WC*. 2(2), 10–18. <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/3204460>
- Rahmat Tisnawan, Rizki Ramadhan Husaini, Muhammad Yazid, dan E. M. S. (2025). *Analisis Karakteristik Marshall dari Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC) dengan Penambahan Limbah Styrofoam (Polystyrene) pada Aspal Penetrasi 60/70*. 4(1). <https://doi.org/10.59086/jti.v4i1.892>
- Sastra, A. Y., & Riyanto, S. (2025). *PENGARUH PENAMBAHAN STYROFOAM KEDALAM CAMPURAN PERKERASAN AC – BC TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHAL*. 6, 321–326. <https://jurnal.polinema.ac.id/index.php/jos-mrk/article/download/6868/4400>
- SNI 06-2440:1991 *Metode Pengujian Kehilangan Berat Minyak*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 06-2489:1991 *Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 15-2049-2004 *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2417:2008 *Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2432:2011 *Cara Uji Daktilitas Aspal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2433:2011 *Cara Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal dengan Alat Cleveland Open Cup*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2434:2011 *Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2441:2011 *Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1969:2016 *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1970:2016 *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI ASTM C136 *Metode Uji untuk Analisis Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.