

Karakteristik Marshall Campuran Aspal Emulsi Dingin Menggunakan *Fly Ash* Sebagai Filler

Ajeng Aissah Safitri^{a,*}, I Dewa Made Alit Karyawan^{a,b}, Ratna Yuniarti^{a,b} dan Hasyim^b

^aProgram Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

^bJurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

* Corresponding author's e-mail: gneejaa@gmail.com

Received: 9 August 2026; revised: 21 August 2026; accepted: 28 August 2026

Abstract: Filler is a fine material that plays a crucial role in determining the performance of asphalt mixtures by influencing their physical and mechanical properties. This study aimed to evaluate the use of fly ash as an additional filler to enhance the performance of Cold Emulsified Asphalt Mixtures (CAED). An experimental method was employed through Marshall testing. The study involved material characterization, determination of the Optimum Residual Asphalt Content (KARO), and evaluation of the Marshall characteristics of CAED containing fly ash at replacement levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% by filler weight. A total of 15 specimens with a filler blend consisting of 50% fly ash and 50% stone dust were prepared to determine the KARO, followed by 15 additional specimens to evaluate the Marshall characteristics of each fly ash variation. The results demonstrated that the fly ash content significantly influenced the Marshall characteristics of CAED. Based on compliance with the applicable specifications, the optimum fly ash content was 50% of the total filler weight, which resulted in a balance of volumetric properties (VIM 3.56%; VMA 23.43%; VFA 84.93%) and mechanical properties (stability 658.4 kg; MQ 259.80 kg/mm). Meanwhile, the mixture containing 25% fly ash exhibited the best mechanical performance with the highest stability value among other fly ash variations (758.45 kg) and an MQ of 264.39 kg/mm. The addition of fly ash as a filler has been shown to improve the characteristics of Marshall CAED when compared to mixtures without fly ash. Further research is recommended to evaluate its long-term performance through the Wheel Tracking Test.

Keywords: CAED, fly ash, Marshall characteristics, filler, asphalt emulsion

Abstrak: Bahan pengisi merupakan material halus yang berperan penting dalam menentukan kinerja campuran aspal karena memengaruhi sifat fisik dan mekanis campuran. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pemanfaatan fly ash sebagai bahan pengisi tambahan untuk meningkatkan kinerja Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED). Penelitian menggunakan metode eksperimental melalui pengujian karakteristik Marshall. Tahapan penelitian meliputi pemeriksaan karakteristik material, penentuan Kadar Aspal Residu Optimum (KARO), serta pengujian Marshall pada campuran CAED dengan variasi kadar fly ash sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap berat bahan pengisi. Sebanyak 15 benda uji digunakan untuk menentukan KARO dengan komposisi bahan pengisi 50% fly ash dan 50% abu batu, kemudian 15 benda uji lainnya digunakan untuk mengevaluasi karakteristik Marshall pada setiap variasi fly ash. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik Marshall CAED dipengaruhi oleh komposisi fly ash. Berdasarkan pemenuhan spesifikasi, kadar optimum fly ash diperoleh pada penggunaan 50% dari berat bahan pengisi yang menghasilkan keseimbangan sifat volumetrik (VIM 3,56%; VMA 23,43%; VFA 84,93%) dan mekanis (stabilitas 658,4 kg; MQ 259,80 kg/mm). Sementara itu, campuran dengan kadar fly ash 25% menunjukkan kinerja mekanis terbaik dengan nilai stabilitas tertinggi di antara variasi *fly ash* lainnya (758,45 kg) dan MQ sebesar 264,39 kg/mm. Penambahan fly ash sebagai bahan pengisi terbukti meningkatkan karakteristik Marshall CAED jika dibandingkan dengan campuran tanpa *fly ash*. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang melalui pengujian Wheel Tracking Test.

Kata kunci: CAED, fly ash, karakteristik Marshall, bahan pengisi, aspal emulsi

1. Pendahuluan

Infrastruktur jalan merupakan salah satu komponen penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan mobilitas di suatu negara. Namun, kerusakan jalan sering terjadi akibat berbagai faktor, seperti kualitas perkerasan yang buruk, beban berlebih, dan kurangnya perawatan [1]. Aspal sering digunakan untuk perbaikan, Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED) menjadi alternatif yang paling efektif.

Penggunaan CAED yang memberikan berbagai keuntungan tetap memiliki keterbatasan, terutama dalam aspek kekuatan, ketahanan terhadap cuaca ekstrem, beban lalu lintas berat, serta kemampuan menahan deformasi. Untuk meningkatkan kualitas CAED, penggunaan bahan pengisi (*filler*) seperti abu batu dapat meningkatkan

stabilitas, kepadatan, dan ketahanan deformasi. Namun, keterbatasan abu batu, seperti ketergantungan pada lokasi penambangan yang meningkatkan biaya transportasi serta dampak lingkungan akibat eksploitasi sumber daya alam, mendorong pencarian alternatif yang lebih berkelanjutan.

Sebagai alternatif, *Fly ash* (FA) atau abu terbang yang merupakan hasil sampingan dari proses pembakaran batu bara pada pembangkit listrik memiliki sifat fisik dan kimia yang dapat meningkatkan kekuatan, daya tahan, serta ketahanan perkerasan jalan terhadap suhu ekstrem dan beban lalu lintas. Pemanfaatannya didorong oleh KLHK melalui Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3 [2]. Dengan produksi mencapai 1,5 juta ton per hari, KLHK terus mendorong pemanfaatan limbah ini dalam infrastruktur, termasuk perkerasan jalan [3]. Selain meningkatkan kinerja aspal,

penggunaan fly ash mengurangi ketergantungan pada bahan baku alami seperti abu batu, menekan dampak lingkungan dari penambangan, serta membantu menurunkan emisi karbon hingga 15% dengan menggantikan produksi semen dan material konstruksi lainnya [4].

Berbagai penelitian telah mengkaji pemanfaatan fly ash pada campuran beraspal. Wuisan dkk (2021) melaporkan tentang penambahan *fly ash* sebagai *filler* dalam campuran aspal emulsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dapat meningkatkan durabilitas campuran aspal tanpa mengurangi stabilitas Marshall [8]. Al Qurny dkk (2022) menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai bahan *filler* dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi permanen [9]. Sementara itu, Maulida (2019) menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* sebagai *filler* (0%, 5%, 10%, 15%) dan gondorukem (2,5%) pada campuran aspal beton (AC-BC) meningkatkan nilai VIM dan VMA [10]. Kartikasari dkk (2017), mencatat bahwa penggunaan fly ash 100% menghasilkan stabilitas yang lebih rendah dibandingkan kombinasi filler lainnya, meskipun masih memenuhi spesifikasi Bina Marga. Sehingga disimpulkan bahwa *fly ash* tetap dapat digunakan sebagai pengganti *filler* dalam campuran aspal karena masih memenuhi spesifikasi Bina Marga [11]. Hasil penelitian Aviv dkk, (2024) mengkaji karakteristik campuran *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC) dengan menggunakan *fly ash* batubara sebagai substitusi *filler*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa komposisi terbaik adalah campuran 50% *fly ash* batubara dan 50% semen, karena memenuhi semua spesifikasi karakteristik pengujian Marshall [12]. Sebaliknya, Yanti dkk (2017), mencatat campuran dengan 100% *fly ash* sebagai *filler* memiliki stabilitas tertinggi dan meningkatkan nilai MQ (Marshall Quotient). Campuran tersebut lebih baik dibandingkan dengan campuran lainnya. Tetapi, penggunaan *fly ash* mengurangi nilai *flow*, yang berarti fleksibilitas campuran menurun [13].

Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada karakteristik aspal emulsi secara umum tanpa mengeksplorasi secara mendalam mengenai potensi fly ash dalam meningkatkan kualitas CAED. Beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa fly ash dapat meningkatkan durabilitas dan ketahanan campuran terhadap deformasi permanen, tetapi penerapannya dalam CAED masih terbatas. Keterbatasan dari studi terdahulu menunjukkan bahwa belum dilakukan variasi penggunaan fly ash sebagai filler pada campuran CAED tipe Lataston Lapis Aus (HRS-WC) berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh variasi fly ash terhadap karakteristik Marshall campuran CAED.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penggunaan fly ash sebagai bahan pengisi terhadap karakteristik Marshall Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED) tipe HRS-WC serta menentukan kadar fly ash yang menghasilkan karakteristik campuran terbaik berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025.

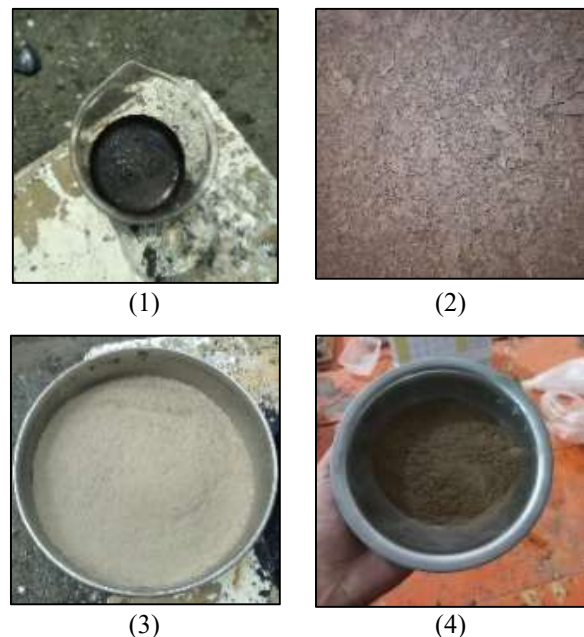
2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Transportasi dan Rekayasa Jalan Raya, Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental untuk menganalisis karakteristik CAED dengan menambahkan *fly ash* sebagai penambah bahan pengisi pada campuran aspal. CAED dirancang agar dapat diterapkan sebagai lapisan permukaan jalan dengan lalu lintas ringan-sedang pada lapisan aus (HRS-WC).

2.2 Material dan Peralatan

Material yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat melalui Gambar 1.



Gambar 1. Bahan Penelitian : (1) aspal emulsi CSS-1h; (2) agregat kasar dan halus; (3) abu batu; (4) *fly ash*.

Aspal Emulsi

Aspal emulsi adalah campuran dari aspal, air, dan bahan pengemulsi (*emulsifier*). Aspal emulsi memiliki keunggulan utama karena dapat digunakan pada suhu ruang, sehingga lebih hemat energi dan ramah lingkungan [14]. Jenis aspal emulsi yang umum digunakan sebagai bahan perkerasan jalan adalah aspal emulsi ionik dan kationik [15]. Aspal emulsi yang digunakan adalah aspal jenis CSS-1h, diperoleh dari PT. Karya Nusantara *Asphalt Mixing Plant* (AMP), Pringgabaya, Kabupaten Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat. Spesifikasi Umum Bina Marga (2025) telah mencantumkan ketentuan dari kriteria aspal emulsi jenis CSS-1h yang dapat digunakan seperti pada Tabel 1 [16].

Agregat

Ukuran agregat dalam campuran beraspal bervariasi, mulai dari yang berukuran besar hingga kecil. Semakin besar ukuran maksimum agregat yang digunakan, semakin beragam ukuran partikel yang terdapat dalam campuran

tersebut. Menurut Bina Marga (2025), agregat dikelompokkan menjadi tiga jenis utama, yaitu agregat kasar (material yang tertahan pada saringan No. 4); agregat halus (material yang melewati saringan No. 4, tetapi tertahan pada saringan No. 200); dan bahan pengisi (material lolos saringan No. 200). Agregat diperoleh dari *Asphalt Mixing Plant* Sinar Bali, Jl. Raya Praya – Mujur, Batunyal, Praya Timur, Kabupaten Lombok Tengah, Nusa Tenggara Barat. Adapun spesifikasi untuk agregat yang dapat digunakan berdasarkan Bina Marga (2025) dapat dilihat pada Tabel 2 [16].

Tabel 1. Ketentuan aspal emulsi CSS-1h

No.	Pengujian	Spesifikasi	
		Min.	Max.
1	Viskositas; <i>Saybolt Furol</i> ;	20 detik	100 detik
2	Stabilitas penyimpanan 24 jam	-	1%
3	Muatan partikel	Positif	
4	Analisis saringan	-	0,1
5	Uji campuran semen	-	0,2
6	Penyulingan	57	-
7	Penetrasi	40	90
8	Daktilitas	40	-
9	Kelarutan dalam <i>trikoloroetilena</i>	97,5	-

Tabel 2. Ketentuan karakteristik agregat

No.	Pengujian	Spesifikasi
1	<i>Impact Value</i>	<30%
2	Berat Jenis	>2,5
3	Penyerapan Air	<3%
4	Kelekatan	>80%

Abu Batu

Abu batu, juga dikenal sebagai *fines* atau bahan halus yang dihasilkan dari proses pemecahan batuan, merupakan salah satu bahan pengisi yang digunakan dalam campuran aspal. Penggunaan abu batu dalam campuran aspal bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas campuran tersebut. Oleh karena itu, kadar abu batu yang baik perlu diuji secara tepat untuk memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Bahan pengisi berupa abu batu diperoleh dari *Asphalt Mixing Plant* Sinar Bali, Jl. Raya Praya – Mujur, Batunyal, Praya Timur, Kabupaten Lombok Tengah, Nusa Tenggara Barat.

Fly Ash

Fly ash atau abu terbang merupakan residu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. Material ini umumnya berwarna keabu-abuan dan terdiri dari partikel-partikel halus. Komposisi kimia *fly ash* meliputi silika, alumina, dan oksida besi dengan kandungan kalsium oksida yang bervariasi tergantung pada jenis batu bara yang digunakan [17]. Fly Ash sebagai penambah bahan pengisi diambil dari sisa pembakaran batu bara di PLTU Jeranjang, Lombok Barat.

Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan: 1) Cetakan benda uji, digunakan untuk membentuk benda uji; 2) Mesin penumbuk, digunakan untuk memadatkan campuran; 3) Alat pengeluaran benda uji, digunakan untuk mengeluarkan benda uji dari cetakan; 4) Alat Marshall, digunakan untuk menguji karakteristik Marshall; 5) Oven, digunakan untuk memanaskan material; 6) Bak perendam, digunakan untuk merendam benda uji; 7) Timbangan, digunakan untuk menimbang material dan benda uji; 8) Termometer, digunakan untuk mengukur suhu; 9) Sendok pengaduk dan spatula, digunakan untuk mencampur dan memindahkan material.

2.3. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED)

Karakteristik CAED dapat dianalisis menggunakan berbagai metode pengujian, salah satunya adalah metode Marshall. Pengujian ini merupakan metode standar yang banyak digunakan untuk mengetahui sifat mekanis campuran aspal, seperti stabilitas dan kelelahan (*flow*) pada campuran tersebut.

CAED menjadi salah satu jenis campuran aspal yang dapat digunakan pada laston lapis aus (HRS-WC) [18]. Persyaratan yang harus dipenuhi dalam pengujian karakteristik CAED berdasarkan Spesifikasi Umum Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (2025) [19].

Pemeriksaan Karakteristik Material

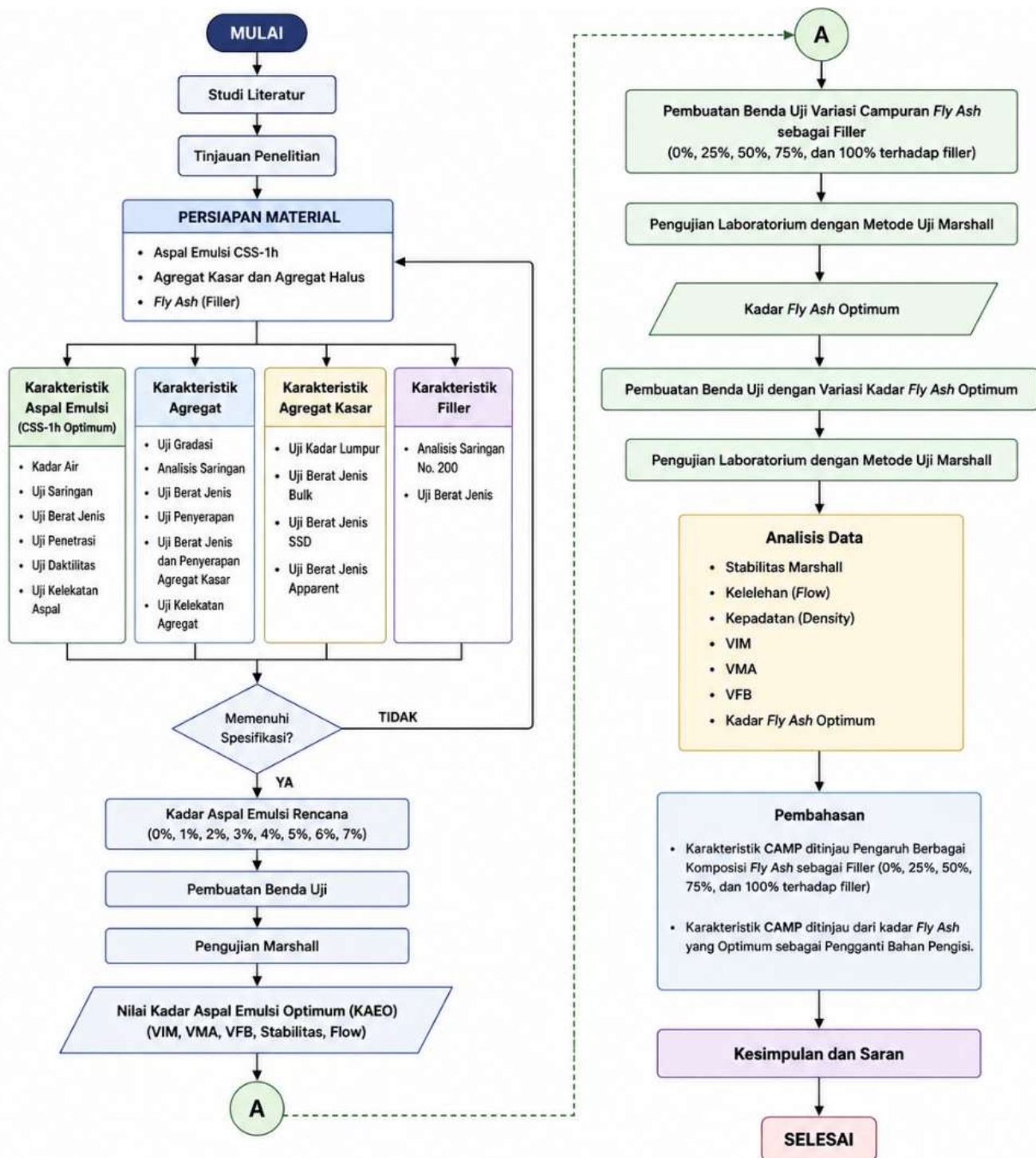
Pemeriksaan karakteristik agregat dibagi menjadi empat pengujian, yaitu pengujian *impact value*, analisis saringan, pengujian berat jenis dan penyerapan agregat, serta kelekatan agregat terhadap aspal. Pemeriksaan karakteristik *fly ash* dilakukan dengan analisis saringan nomor 200 dan berat jenis *fly ash*. Pemeriksaan karakteristik aspal emulsi dilakukan dengan pengujian kadar residu dan berat jenis aspal.

Penentuan Nilai Kadar Aspal Residu Optimum (KARO)

Komposisi *filler* direncanakan dengan persentase *fly ash* sebesar 50% dan abu batu sebesar 50%. Dilakukan pengujian untuk mencari Kadar Aspal Residu Optimum (KARO) dengan kadar aspal yang telah diperhitungkan terhadap berat total campuran sebesar 1.200 gram. Perencanaan variasi dan jumlah benda uji yang akan dibuat dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Variasi dan jumlah benda uji penentuan KARO

No.	Kadar Aspal Residu Optimum (KARO), %	Komposisi <i>filler</i> (50% <i>fly ash</i> ; 50% abu batu)
1	Pb - 1	3
2	Pb - 0,5	3
3	Pb	3
4	Pb + 0,5	3
5	Pb + 1	3
Jumlah		15



Gambar 2. Tahapan penelitian

Pembuatan Benda Uji dan Pemeriksaan Karakteristik CAED dengan Metode Marshall

Pembuatan benda uji dilakukan sebanyak 2 tahap. Pada tahap pertama, benda uji dibuat sesuai dengan KARO yang telah diuji dan menggunakan variasi *fly ash* yang sudah direncanakan. Kemudian, tahap kedua dilakukan apabila kadar *fly ash* optimum yang didapat bukan merupakan salah satu dari variasi yang telah direncanakan. Variasi dan jumlah benda uji yang akan dibuat dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rancangan variasi dan jumlah benda uji CAED

No.	Komposisi <i>filler</i>	Jumlah Benda Uji
1	0% <i>fly ash</i> ; 100% abu batu	3
2	25% <i>fly ash</i> ; 75% abu batu	3
3	50% <i>fly ash</i> ; 50% abu batu	3
4	75% <i>fly ash</i> ; 25% abu batu	3
5	100% <i>fly ash</i> ; 0% abu batu	3
6	Kadar <i>fly ash</i> optimum	3
Jumlah		18

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Material

Untuk melakukan pembuatan benda uji dan pengujian Marshall, dilakukan pengujian karakteristik material. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh karakteristik material telah memenuhi spesifikasi yang berlaku. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5 sampai Tabel 8.

Tabel 5. Karakteristik agregat kasar

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Hasil	Keterangan
1	Uji <i>Impact Value</i>	<30%	18.51	Memenuhi
2	Berat Jenis Semu (Gsa)	>2,5	2.86	Memenuhi
3	Berat Jenis Kering (Gsb)	>2,5	2.72	Memenuhi
4	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (Gss)	>2,5	2.77	Memenuhi
5	Penyerapan Air (Gsw)	<3%	1.76	Memenuhi
6	Kelekatan	>80%	94%	Memenuhi

(*) Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)

Tabel 6. Karakteristik agregat halus

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis Semu (Gsa)	>2,5	2.86	Memenuhi
2	Berat Jenis Kering (Gsb)	>2,5	2.65	Memenuhi
3	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (Gss)	>2,5	2.73	Memenuhi
4	Penyerapan Air (Gsw)	<3%	2.74	Memenuhi

(*) Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)

Tabel 7. Karakteristik filler

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis Abu Batu	>2,5	2.52	Memenuhi
2	Berat Jenis <i>Fly Ash</i>	>2,5	2.67	Memenuhi

(*) Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)

Tabel 8 Hasil pemeriksaan karakteristik aspal emulsi

No.	Pemeriksaan	Syarat*	Hasil
1	Kadar Residu**	>57	63,30%
2	Berat Jenis Aspal**	>1	1,05
3	Muatan Partikel Listrik	Positif	Positif
4	Pengendapan Per 24 Jam	<1	0,81%
5	Viskositas	20-100	85
6	Analisa Saringan	<1	0%
7	Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i>	>1	1,02%

(*) Spesifikasi Umum Bina Marga (2025) (**) Hasil Pengujian

3.2 Penentuan Kadar Aspal Residu Optimum (KARO)

Kadar aspal emulsi awal diestimasi terhadap berat total campuran berdasarkan proporsi fraksi agregat, dengan proporsi agregat kasar, halus, dan *filler* berturut-turut adalah 22,14%; 69,01; dan 8,85%.

$$P = (0,05 \times 22,14 + 0,1 \times 69,0 + 0,5 \times 8,85) \times 0,7$$

$$= (1,11 + 3,45 + 0,44) \times 0,7$$

$$= 8,7037\%$$

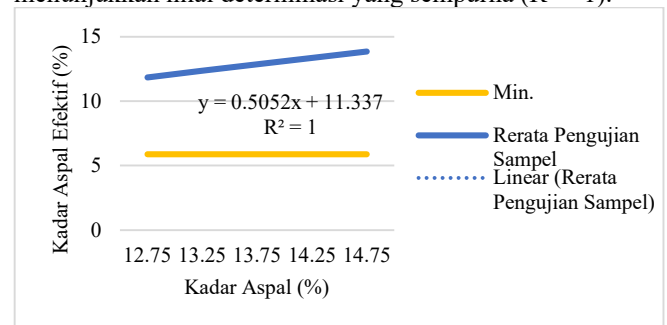
Hasil dari perkiraan awal kadar aspal emulsi kemudian dihitung sebagai kadar aspal emulsi awal terhadap berat total campuran. Dengan menggunakan $X = 63,30\%$ (hasil pengujian kadar residu aspal emulsi).

$$P_b = \frac{8,7037}{63,30\%} = 13,75\%$$

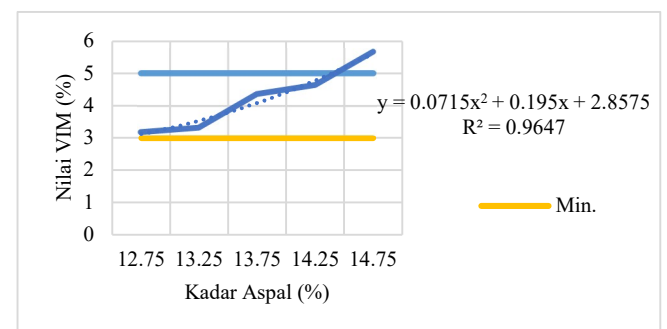
Seluruh hasil pengujian serta perhitungan sifat volumetrik dan mekanik dari Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED) yang telah dilakukan, dibuat rekapitulasi data untuk mendapatkan nilai Kadar Aspal Residu Optimum (KARO).

3.2.1 Sifat Volumetrik

Grafik pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa nilai kadar aspal efektif meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Di mana seluruh variasi tersebut berhasil memenuhi batas spesifikasi minimum secara konsisten. Peningkatan ini terjadi karena penambahan volume aspal emulsi secara langsung mempertebal selimut aspal yang melapisi agregat. Ketebalan selimut aspal sangat krusial dalam menjaga durabilitas campuran agar tidak mudah mengalami retak ataupun penuaan dini. Grafik ini menunjukkan tingkat akurasi atau penentuan yang tinggi, dibuktikan oleh grafik yang menunjukkan nilai determinasi yang sempurna ($R^2 = 1$).

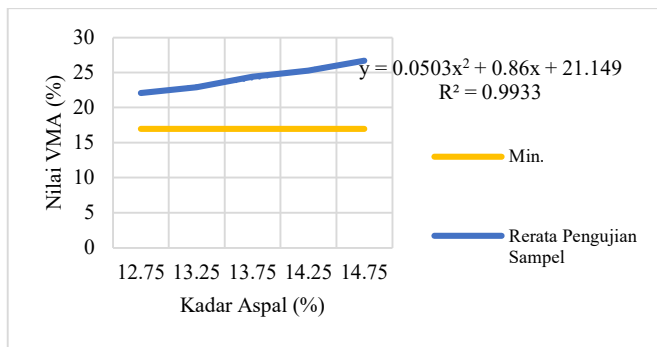


Gambar 3. Grafik hubungan kadar aspal dengan kadar aspal efektif



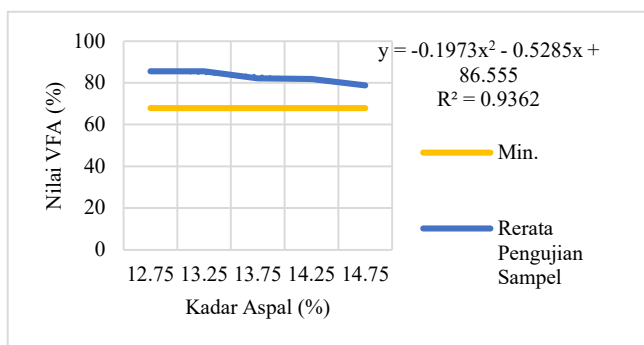
Gambar 4. Grafik hubungan kadar aspal dengan VIM

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai VIM mengalami peningkatan yang signifikan seiring bertambahnya kadar aspal, terutama pada kadar aspal 14,75%, nilainya telah melebihi batas maksimum spesifikasi yang berlaku. Tren ini sangat bertolak belakang dengan karakteristik aspal panas konvensional, di mana penambahan aspal biasanya mengisi rongga dan menurunkan nilai VIM. Kondisi ini menegaskan bahwa penentuan kadar aspal pada CAED sangat sensitif terhadap sisa penguapan kandungan air emulsi. Hal ini dapat memberikan batas atas kadar aspal agar tidak memicu kegagalan volumetrik di lapangan.



Gambar 5. Grafik hubungan kadar aspal dengan VMA

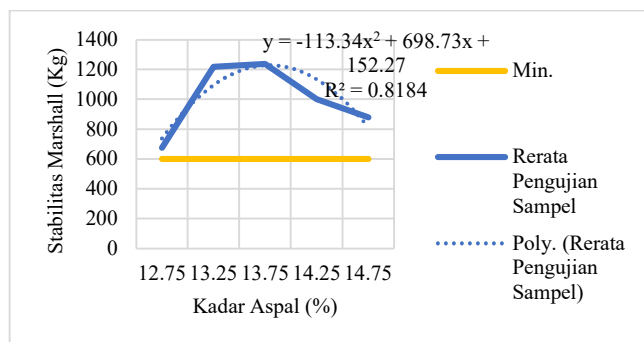
Gambar 5 memperlihatkan bahwa nilai VMA mengalami peningkatan yang konstan seiring bertambahnya kadar aspal di dalam campuran, dengan seluruh nilai pengujian berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan. Berbeda dengan aspal panas, grafik ini menunjukkan karakteristik khas CAED yang memerlukan ruang volumetrik lebih longgar akibat adanya unsur air. Pemenuhan nilai VMA yang berada di atas batas minimum menunjukkan adanya ketersediaan ruang yang cukup bagi aspal untuk menyelimuti agregat tanpa membuat campuran terlalu padat.



Gambar 6. Grafik hubungan kadar aspal dengan VFA

Grafik pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa nilai VFA cenderung mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar aspal. Meskipun nilai VFA mengalami penurunan, seluruh hasil pengujian tetap memenuhi spesifikasi minimum yang berlaku. Kadar aspal perlu dijaga agar nilai VFA tidak terus menurun di bawah batas aman.

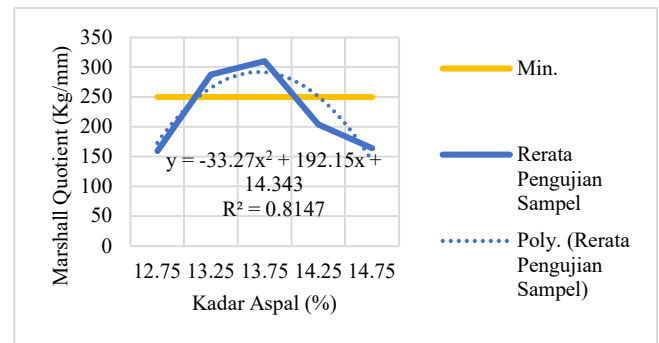
3.2.2 Sifat Mekanis



Gambar 7. Grafik hubungan kadar aspal dengan stabilitas

Grafik pada Gambar 7 mengindikasikan bahwa nilai stabilitas dari campuran meningkat seiring dengan

peningkatan kadar aspal hingga mencapai puncaknya pada kadar aspal 13,75%. Kekuatan meningkat seiring penambahan kadar aspal, hingga mencapai puncaknya pada kadar 13,75%. Pola kurva ini sejalan dengan data parameter mekanik yang dipaparkan oleh Karyawan dkk. (2025), di mana kekuatan puncak dicapai sebelum campuran jenuh aspal [20].



Gambar 8. Grafik hubungan kadar aspal dengan Marshall Quotient

Grafik pada Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai MQ mengalami peningkatan yang signifikan sampai kadar aspal 13,75%. Hal ini merepresentasikan tingkat kekakuan campuran. Penurunan nilai MQ menunjukkan adanya aspal emulsi berlebih yang membuat campuran menjadi terlalu plastis dan kehilangan sifat elastis ketika menerima beban kejut.

Tabel 9. Rekapitulasi data untuk penentuan KARO

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal (%)					SPESIFIKASI
	12.7	13.25	13.75	14.25	14.7	
KAE (%)	11.8 4	12.35	12.85	13.36	13.8 6	min. 5,9
VIM (%)	3.18	3.32	4.36	4.63	5.65	min. 3 max. 5
VMA (%)	22.1 1	22.90	24.40	25.28	26.7 3	min. 17
VFA (%)	85.6 1	85.49	82.18	81.85	78.8 6	min. 68
Stabilitas (Kg)	675. 5	1217.7	1237.4	1000.4	877. 5	min. 600
Flow (mm)	4.27	4.27	4.00	4.93	5.38	-
MQ (Kg/mm)	159.1	287.6	310.1	203.7	163.7	min. 250

(*) Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)

Keterangan:

	: Tidak memenuhi
	: Memenuhi

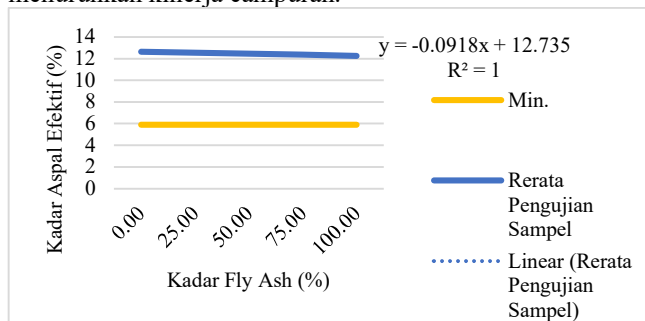
Berdasarkan rekapitulasi tersebut, dapat dilihat bahwa kadar aspal 13,25% dan 13,75% memenuhi seluruh Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Sedangkan untuk kadar aspal 12,75% dan 14,25%, sifat mekanis tidak memenuhi spesifikasi. Untuk kadar aspal 14,75%, sifat volumetrik dan mekanis dari campuran tidak memenuhi spesifikasi. Sehingga Kadar Aspal Residu Optimum (KARO) yang digunakan adalah sebesar 13,5%.

3.3 Pengujian Marshall dengan Variasi Kadar Fly Ash

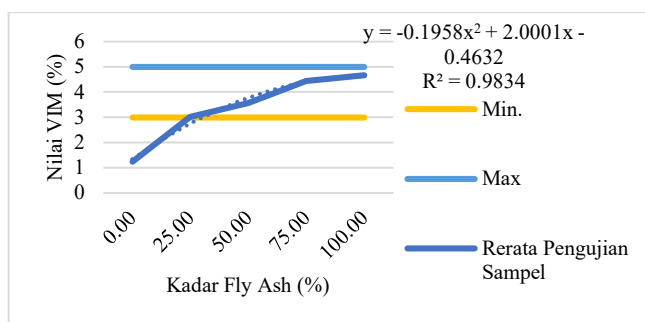
Nilai Kadar Aspal Residu Optimum (KARO) yang telah diperoleh pada pembahasan sebelumnya menjadi dasar untuk melakukan pengujian Marshall dengan variasi kadar *fly ash* sebagai bahan pengisi tambahan. Berdasarkan hasil pengujian serta perhitungan sifat volumetrik dan mekanik dari Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED) yang telah dilakukan, dibuat rekapitulasi data untuk memperoleh kadar *fly ash* optimum.

3.3.1 Sifat Volumetrik

Grafik pada Gambar 9 memperlihatkan bahwa seluruh variasi *fly ash* memenuhi spesifikasi, tetapi kadar aspal efektif menurun seiring bertambahnya *fly ash*. Hal ini mengindikasikan bahwa *fly ash* dengan luas permukaan yang tinggi menyerap lebih banyak aspal, sehingga jumlah aspal efektif sebagai pengikat berkurang. Fenomena tersebut sesuai dengan karakteristik *filler* halus yang meningkatkan kebutuhan aspal efektif [21]. Oleh karena itu, penggunaan *fly ash* perlu dibatasi agar penurunan aspal efektif tidak menurunkan kinerja campuran.



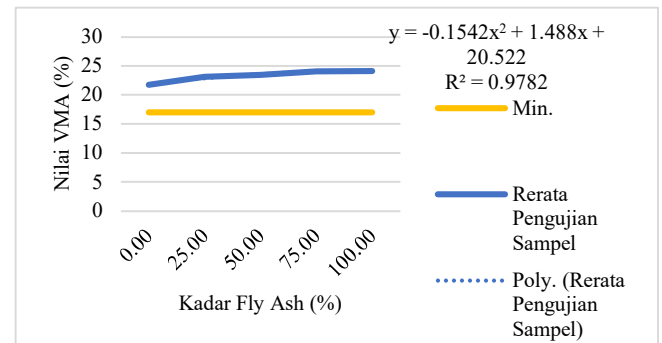
Gambar 9. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan kadar aspal efektif



Gambar 10. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan VIM

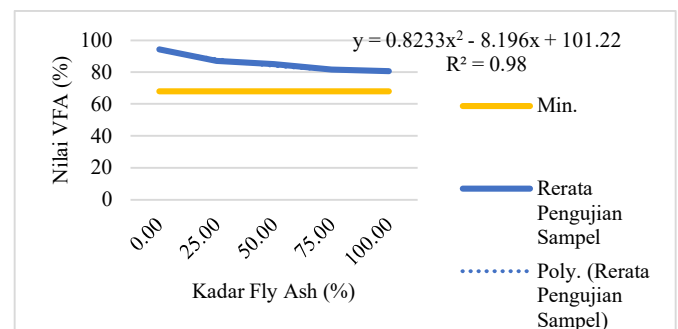
Gambar 10 mengindikasikan bahwa nilai VIM meningkat dengan bertambahnya kadar *fly ash*, sedangkan campuran tanpa *fly ash* belum memenuhi spesifikasi minimum. Kondisi ini menunjukkan bahwa *fly ash* membantu membentuk rongga yang mendukung proses penguapan air emulsi selama curing. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Karyawan dkk. (2024) mengenai peran *filler* dalam pembentukan struktur rongga pada campuran bergradasi rapat. Dengan demikian, penggunaan *fly ash* dapat memperbaiki

karakteristik volumetrik CAED selama kadarnya tetap dikendalikan. [22].



Gambar 11. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan VMA

Data pada Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai VMA meningkat secara bertahap dan seluruh variasi memenuhi spesifikasi minimum. Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa partikel *fly ash* yang sangat halus memengaruhi susunan agregat sehingga volume rongga antaragregat menjadi lebih besar. Fenomena ini sesuai dengan teori *filler* mineral yang menjelaskan pengaruh ukuran partikel terhadap sifat volumetrik campuran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* masih mampu mempertahankan ruang yang cukup bagi aspal untuk melapisi agregat [22].



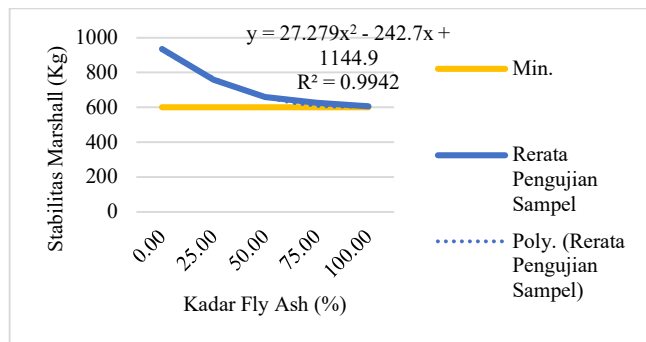
Gambar 12. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan VFA

Pada Gambar 12, hasil analisis mengungkapkan bahwa nilai VFA menurun seiring meningkatnya kadar *fly ash*, meskipun seluruh variasi masih memenuhi spesifikasi. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian aspal efektif terserap oleh *fly ash* sehingga proporsi rongga yang terisi aspal menjadi lebih kecil. Hasil tersebut sesuai dengan karakteristik *filler* aktif yang meningkatkan kebutuhan aspal efektif. Oleh karena itu, kadar *fly ash* perlu dioptimalkan agar durabilitas campuran tetap terjaga. Hal ini sejalan dengan penelitian mengenai karakteristik parameter volumetrik aspal dingin emulsi, di mana rasio VFA mengalami penyusutan sebagai dampak dari ruang kosong yang ada setelah penguapan cairan emulsi [23]. Analisis grafik ini dapat menunjukkan keseimbangan antara distribusi sisa aspal di dalam rongga perkerasan.

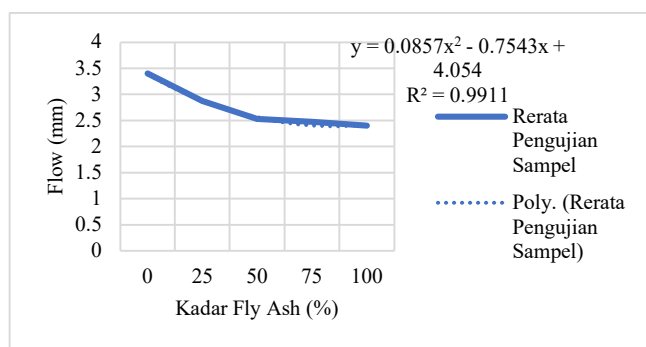
3.3.2 Sifat Mekanis

Gambar 13 memperlihatkan bahwa nilai stabilitas menurun dengan bertambahnya kadar *fly ash*, walaupun

seluruh variasi masih memenuhi spesifikasi minimum. Penurunan ini menunjukkan bahwa meningkatnya penyerapan aspal oleh *fly ash* mengurangi kemampuan ikatan antaragregat, sehingga kekuatan campuran menurun. Karakteristik pelemahan nilai stabilitas akibat dominasi filler pozzolan nonkonvensional ini terkonfirmasi normal dan sesuai dengan hasil uji laboratorium *fly ash* terhadap stabilitas Marshall campuran aspal, yang membuktikan takaran abu pengisi yang terlalu pekat cenderung menekan kestabilan mekanis aspal akibat berkurangnya jumlah perekat aktif bebas [9]. Oleh karena itu, penggunaan *fly ash* perlu dibatasi agar kekuatan perkerasan tetap optimal.

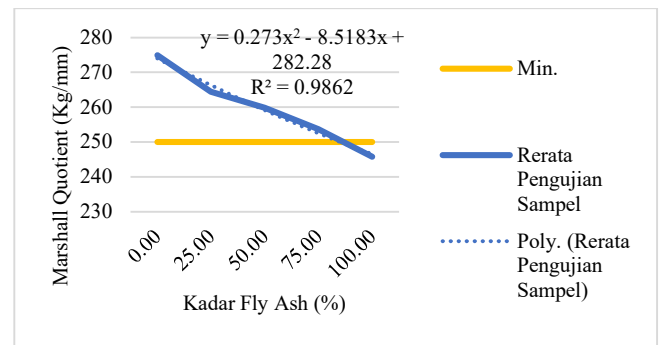


Gambar 13. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan stabilitas



Gambar 14. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan *flow*

Grafik pada Gambar 14, penurunan nilai *flow* seiring meningkatnya kadar *fly ash*, dari nilai tertinggi 3,40 mm (kadar 0%) menjadi 2,80 mm (kadar 25%), lalu mengalami penurunan pada 2,51 mm (kadar optimum 50%) hingga 2,40 mm (kadar 100%). Penurunan nilai *flow* terjadi karena *fly ash* menyerap aspal bebas, sehingga campuran menjadi lebih kental dan kaku. Akibatnya, rongga antarbatuan menjadi lebih rapat dan tidak mudah bergeser saat menerima beban. Pada kadar 25%, kondisi ini membuat ikatan antaragregat menjadi sangat kuat hingga mencapai stabilitas tertinggi. Kecenderungan penurunan nilai *flow* seiring dengan meningkatnya konsentrasi *fly ash* ini sejalan dengan temuan Khan dkk. [24] pada campuran aspal emulsi dingin, serta diperkuat oleh studi perkerasan HRS-WC oleh Pubmedia [25] yang menyatakan bahwa *fly ash* dapat mengikat campuran aspal dengan kuat, sehingga aspal menjadi lebih kaku dan tidak mudah berubah bentuk saat dilewati kendaraan.



Gambar 15. Grafik hubungan kadar *fly ash* dengan Marshall Quotient

Merujuk pada kurva Gambar 15, nilai Marshall Quotient (MQ) menurun seiring meningkatnya kadar *fly ash* dan pada kadar 100% tidak lagi memenuhi spesifikasi. Hal ini mengindikasikan bahwa berkurangnya aspal efektif menyebabkan campuran menjadi kurang kaku, lebih elastis, dan lebih mudah mengalami deformasi struktural dini. Temuan ini sejalan dengan penelitian Karyawan dkk. (2023) mengenai pengaruh filler terhadap karakteristik campuran aspal emulsi dingin [26]. Dengan demikian, grafik memberikan titik batas kritis mekanis untuk mengoptimalkan keawetan campuran pada perkerasan. Di mana penggunaan *fly ash* hingga 75% masih layak diterapkan, sedangkan penggunaan 100% tidak direkomendasikan karena menurunkan kekakuan campuran

3.3.3 Penentuan Kadar Fly Ash Optimum

Tabel 10. Rekapitulasi karakteristik marshall dengan variasi kadar *fly ash*

Karakteristik Marshall	Kadar Fly Ash					Spesifikasi
	0%	25%	50%	75%	100%	
KAE (%)	12.64	12.55	12.46	12.37	12.28	min. 5,9
VIM (%)	1.25	3.01	3.56	4.43	4.67	min. 3 max. 5
VMA (%)	21.78	23.09	23.43	24.03	24.13	min. 17
VFA (%)	94.28	86.95	84.93	81.59	80.68	min. 68
Stabilitas (Kg)	935.1	758.4	658.5	625.7	606.4	min. 600
Flow (mm)	3.40	2.87	2.53	2.47	2.47	-
MQ (Kg/mm)	274.9	264.3	259.8	253.7	245.8	min. 250

(*) Spesifikasi Umum Bina Marga (2025)

Berdasarkan rekapitulasi data pada Tabel 10, dapat ditarik kesimpulan menyeluruh bahwa penggunaan variasi kadar *fly ash* sebesar 25%, 50%, dan 75% merupakan pilihan terbaik yang sukses memenuhi seluruh parameter standar Spesifikasi Umum Bina Marga (2025). Evaluasi batas fungsional menunjukkan kegagalan pada variasi *fly ash* 0% akibat nilai VIM (1,25%) yang terlalu padat di bawah ambang batas minimum, serta kegagalan pada variasi 100% akibat nilai MQ (245,85 kg/mm) yang jatuh di bawah batas kekakuan minimum 250 kg/mm. Secara ilmiah, performa mekanis terbaik pada kadar 25% terjadi karena *fly ash* bertindak sebagai filler aktif yang mengisi rongga antaragregat secara proporsional tanpa menyerap aspal bebas secara berlebihan, sehingga menghasilkan ikatan aspal yang kuat dengan nilai stabilitas puncak (758,45 kg). Namun, nilai stabilitas yang tinggi membuat campuran memiliki fleksibilitas yang rendah,

sehingga nilai *flow* (kelelehan) cenderung lebih rendah dan rongga udara menjadi lebih kecil (3,01%). Sebaliknya, pada kadar 50%, luas permukaan *fly ash* yang tinggi menyerap aspal efektif lebih banyak sehingga menurunkan KAE menjadi 12,46%. Fenomena penyerapan aspal ini justru berdampak positif karena berhasil meningkatkan volume rongga udara secara aman (VIM naik menjadi 3,56%). Kenaikan VIM pada kadar 50% ini sangat penting dalam struktur CAED karena menyediakan ruang yang ideal untuk penguapan dan pelepasan kandungan air emulsi selama proses pengerasan (*curing*). Kondisi rongga yang ideal ini berbanding lurus dengan peningkatan nilai *flow*. Oleh karena itu, variasi 50% ditetapkan sebagai kadar optimum fungsional karena berhasil mempertemukan titik aman seluruh parameter volumetrik dan mekanis sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Integrasi data volumetrik dan sifat mekanis ini membuktikan secara ilmiah bahwa intervensi *fly ash* dalam rentang optimum memberikan nilai tambah (*strength*) berupa pemanfaatan limbah industri yang ramah lingkungan, sekaligus memperbaiki kinerja rongga penguapan tanpa harus mengorbankan stabilitas struktural Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED) di lapangan.

4. Kesimpulan

- 1) Penambahan *fly ash* sebagai bahan pengisi campuran CAED tipe HRS-WC memengaruhi karakteristik volumetrik dan mekanis CAED. Variasi *fly ash* 0% gagal memenuhi spesifikasi batas minimum rongga (VIM hanya 1,25%), sementara variasi 100% gagal memenuhi batas kekakuan minimum (MQ hanya 245,85 kg/mm).
- 2) Kadar *fly ash* sebesar 25% memberikan kinerja mekanis terbaik dengan nilai stabilitas tertinggi mencapai 758,45 kg dan MQ sebesar 264,39 kg/mm.
- 3) Kadar *fly ash* sebesar 50% ditetapkan sebagai kadar optimum fungsional karena menghasilkan keseimbangan performa struktural terbaik yang secara konsisten memenuhi seluruh parameter Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 (VIM 3,56%; VMA 23,43%; VFA 84,93%; Stabilitas 658,54 kg; MQ 259,80 kg/mm).

Saran

- 1) Penelitian lebih lanjut mengenai stabilitas dinamis dan deformasi permanen (uji wheel track) disarankan untuk mengkaji kinerja jangka panjang Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED) dengan *fly ash* sebagai bahan pengisi tambahan.
- 2) Penelitian selanjutnya disarankan untuk lebih memperhatikan seluruh prosedur yang berlaku, terutama dalam pelaksanaan waktu *curing* Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED).

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Mataram atas dukungan pendanaan melalui Skema Penelitian Pascasarjana DIPA BLU Tahun Anggaran 2025, berdasarkan Kontrak Penelitian Nomor 3249/UN18.L1/PP/2025. Dukungan pendanaan dan fasilitasi kelembagaan yang diberikan sangat membantu dalam pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Dinas PUPR, “Beberapa Faktor yang Menjadi Penyebab Terjadinya Kerusakan Jalan Raya”, Dinas PUPR Kota Banda Aceh, 2020. <https://dinaspupr.bandaacehkota.go.id/2020/06/28/beberapa-faktor-yang-menjadi-penyebab-terjadinya-kerusakan-jalan-raya/>
- [2] S. Surianti and I. Agus, “Analisis Pengaruh Fly Ash sebagai Filler pada Campuran Hot Mix Asphalt untuk Lapis Perkerasan AC-Base”, *Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil UNIDAYAN*, vol. 9, no. 2, pp. 83–88, 2020. <https://doi.org/10.55340/jmi.v9i2.657>
- [3] G. Gunawan and Nono, “Potensi Pemanfaatan Bahan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash Untuk Lapisan Fondasi Jalan Semen”, *Jurnal Jalan-Jembatan*, vol. 36, no. 1, pp. 19–29, 2019.
- [4] K.A. Karmadi and N.L. Widyasari, “Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen Portland Untuk Mengurangi Emisi Karbon”, *Jurnal Ecocentrism*, vol. 4, no. 2, pp. 54–66, 2024. <https://doi.org/10.36733/jeco.v4i2>
- [5] N. Azizah and B. Rahardjo, “Kinerja Campuran Hot Rolled Sheet-Wearing Course (HRS-WC) Dengan Filler Abu Ampas Tebu”, *Jurnal Bangunan*, vol. 22, no. 2, pp. 11–20, 2017. <https://doi.org/10.17977/um071v22i22017p11-20>
- [6] G.G. Santoso, R. Arfandy, P.S. Wulandari, and H. Patmadjaja, “Karakteristik Campuran Aspal Emulsi Dingin dengan Variasi Gradasi Agregat Batas Atas Hingga Batas Tengah”, *Jurnal Dimensi Utama Teknik Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 86–93, 2018.
- [7] A. Hartanto, I. Sugiharto, P. S. Wulandari, and H. Patmadjaja, “Analisa Karakteristik Campuran Aspal Emulsi Dingin dan Perbandingan Stabilitas Aspal Emulsi Dingin dengan Laston”, *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2016.
- [8] Y. Wuisan, K. R. Gotama, P. S. Wulandari, and H. Patmadjaja, “Pengaruh Ukuran Serbuk Ban Bekas Sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Aspal Emulsi Dingin Dengan Filler Fly Ash Tipe C”, *Jurnal Dimensi Utama Teknik Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 304–311, 2021.
- [9] A. U. Al Qurny, I. Hagni Puspito, and N. Tinumbia, “Pengaruh Penambahan Bahan Pengisi (Filler) Fly Ash Terhadap Campuran Aspal Beton Lapis Aus (Asphalt Concrete Wearing Course/AC-WC)”, *Jurnal ARTESIS*, vol. 2, no. 1, pp. 87–97, 2022. <https://doi.org/10.35814/artesis.v2i1.3766>
- [10] Y.R. Maulida, “Pengaruh Penambahan Gondorukem dan Filler Abu Batu (Fly Ash) pada Laston (AC-BC) terhadap Karakteristik Marshall”, 2019.
- [11] D. Kartikasari and S.D. Hartantyo, “Penggantian Filler Dengan Fly Ash Dan Serbuk Batu Bata Pada Campuran Aspal (AC-WC)”, *UKaRsT*, vol. 1, no. 1, p. 9, 2017.
- [12] A.M. Aviv, M.W. Hasan, and E.S. Ayu, “Pengaruh Substitusi Limbah Bata Merah Dan Fly Ash Sebagai

- Filler Campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)", 2024.
- [13] G. Yanti, S.W. Megasari, and H. Rahmat, "Karakteristik Marshall pada Campuran AC-BC dengan Penambahan Bahan Pengisi (Filler) Fly Ash", *Jurnal Rab Construction Research*, vol. 2, no. 1, pp. 158–165, 2017.
- [14] S. Sukirman, *Beton Aspal Campuran Panas*, 3rd ed. Bandung, Indonesia: Institut Teknologi Nasional, 2016.
- [15] S. Sukirman, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung, Indonesia: Nova, 1999.
- [16] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2025.
- [17] ASTM International, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-08, 2008. <https://doi.org/10.1520/C0618-08>
- [18] I.N.A. Thanaya and P.C. Wibawa, *Teknologi Campuran Aspal Emulsi Dingin (CAED)*. Denpasar, Indonesia: Udayana University Press, 2019.
- [19] Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia, *Pedoman Pelaksanaan Lapis Campuran Beraspal Panas*, Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 28/PRT/M/2007. Jakarta, Indonesia: Departemen Pekerjaan Umum, 2007.
- [20] I.D.M.A. Karyawan, M. Mahendra, I.A.O.S. Sideman, R. Yuniarti, and J. Fajrin, "Durabilitas Campuran Aspal Emulsi Dingin dengan Substitusi Serbuk Karet Ban Bekas sebagai Agregat Halus", *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, vol. 7, no. 2, pp. 785–796, 2025. <https://doi.org/10.53863/kst.v7i02.1888>
- [21] H. Fitriani, "Pengaruh Penggunaan Variasi Semen, Fly Ash, dan Aspal Emulsi Terhadap Karakteristik Volumetrik dan Mekanis CAED", *Jurnal Elektronik Repositori Universitas Mataram*, pp. 1–12, 2024. <https://eprints.unram.ac.id/47222/>
- [22] I.D.M.A. Karyawan, R. Yuniarti, D. Widiyanti, F.F. Salsabila, B.S. Furwati, and B.A.L. Santi, "Analysis of Volumetric Characteristics of Cold Emulsion Asphalt Mixtures on Closed and Open Gradation with Cement and Lime Filler Variations", *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, vol. 10, no. 12, pp. 10366–10375, 2024. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i12.9745>
- [23] I.D.M.A. Karyawan, D. Widiyanti, and A. Febriana, "Potensi Pemanfaatan Limbah Plastik HDPE Sebagai Bahan Aditif untuk Meningkatkan Kinerja Perkerasan AC-BC", *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, vol. 7, no. 1, pp. 468–479, 2025. <https://doi.org/10.53863/kst.v7i01.1660>
- [24] P. Deb and Kh. Lakshman Singh, "Utilization of Fly Ash and Rice Husk Ash in Cold Mix Asphalt as Filler", *E3S Web of Conferences*, vol. 455, p. 03009, 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345503009>
- [25] I. Hairul, E. Anwar, M. Aulia, and H. Hafiz, "The Effect of Adding Fly Ash as a Filler on Lataston Mixtures (HRS-WC)", *Pubmedia Civil Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 45–53, 2024.
- [26] I.D.M.A. Karyawan, M. Mahendra, B. Anshari, and E. Setiawan, "Konsistensi dan Setting Time Bubur Aspal Emulsi Menggunakan Filler Fly Ash dan Mastic Asbuton", *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 176–188, 2023. <https://doi.org/10.31849/siklus.v9i2.16221>