

## Penggunaan Fly Ash dan POFA sebagai Filler dalam Modifikasi Campuran Aspal Hotmix AC-BC

Syaifuddin\*, Kurniati, Gusrizal, Miswar, Nadia Ulfa

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Lhokseumawe  
Jl. Banda Aceh - Medan Km 275,5 Buketrata Lhokseumawe, Indonesia

\*E-mail: [syaifuddin@pnl.ac.id](mailto:syaifuddin@pnl.ac.id)

### Abstract

---

**Article history:**

Received: 27-03-2025

Accepted: 18-04-2025

Published: 29-04-2025

**Keywords:**

AC-BC mixtures,

filler,

fly ash,

hotmix asphalt,

POFA.

*This study evaluates the use of POFA (Palm Oil Fuel Ash) and Fly Ash as fillers in Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) mixtures. POFA was sourced from palm oil processing plants, while Fly Ash was obtained from coal-fired power plants. The research aims to identify the optimal filler composition by varying the proportions of POFA and Fly Ash, ranging from 0% to 100% POFA. Marshall parameter tests were conducted to assess stability, flow, VIM (Void in Mix), VMA (Void in Mineral Aggregate), and Marshall Quotient. The results show that POFA significantly improves the stability of the asphalt mixture compared to Fly Ash, with the highest stability observed at 100% POFA. However, increasing the amount of POFA also led to higher VIM values, indicating more air voids within the asphalt mixture, which could affect its long-term durability. The combined use of POFA and Fly Ash as fillers demonstrates that both can be utilized in AC-BC asphalt mixtures without compromising quality or failing to meet the 2018 Bina Marga specifications. The study concludes that POFA is a viable alternative filler for asphalt mixtures, particularly for improving the stability and performance of surface layers in road construction.*

---

### 1. Pendahuluan

Jalan raya merupakan infrastruktur vital yang mendukung mobilitas dan pertumbuhan ekonomi suatu negara[1]. Di Indonesia, dengan lalu lintas kendaraan yang tinggi, ketahanan dan kualitas jalan sangat penting untuk menjaga keberlanjutan transportasi dan keselamatan. Salah satu jenis lapisan perkerasan yang umum digunakan adalah aspal AC-BC, yang berfungsi sebagai lapisan antara untuk menahan beban dari lapisan aus (wearing course) dan mendistribusikannya ke lapisan dasar. Namun, salah satu tantangan utama dalam perkerasan aspal adalah meningkatkan ketahanan dan stabilitas campuran aspal terhadap beban lalu lintas dan cuaca[2].

Aspal adalah zat perekat material berwarna hitam atau gelap, berbentuk padat atau semi padat, yang dapat diperoleh dari alam ataupun sebagai hasil produksi. Aspal dapat diperoleh dari alam ataupun merupakan residu dari hasil penyulingan minyak bumi. Aspal bersifat termoplastis yaitu mencair jika dipanaskan dan kembali membeku jika temperatur turun. Sifat ini digunakan dalam proses konstruksi perkerasan jalan. Banyaknya aspal dalam campuran perkerasan berkisaran antara 4-10% berdasarkan berat campuran atau 10-15% berdasarkan volume campuran [3].

Jenis mineral agregat yang biasanya lolos saringan no. 200 dikenal sebagai *filler* atau bahan pengisi. Bahan pengisi ini mengisi rongga antara partikel agregat kasar sehingga mengurangi ukuran rongga dan meningkatkan kerapatan dan stabilitas massanya. Rongga udara agregat kasar diisi dengan partikel yang lolos saringan no. 200, sehingga rongga udara lebih kecil dan kerapatan massanya lebih besar [4].

*Filler* adalah sekumpulan mineral agregat yang umumnya lolos saringan no. 200, *filler* atau bahan pengisi ini akan mengisi rongga antara partikel agregat kasar dalam rangka mengurangi besar rongga, meningkatkan kerapatan dan stabilitas dari massa tersebut. Rongga udara pada agregat kasar diisi dengan partikel yang lolos saringan no. 200, sehingga membuat rongga udara lebih kecil dan kerapatan massanya lebih besar. Pengisi (*filler*) terdiri dari dua kategori kimia aktif dan kimia tidak aktif. Bahan pengisi kimia aktif, seperti semen portland (disarankan semen tipe I, biasanya portland cement atau *OPC*), kapur terhidrasi, dan *amonium sulfat*, digunakan untuk meningkatkan kelecakan (*workability*) dan mengatur waktu pengikatan (*setting time*). Bahan pengisi kimia tidak aktif, seperti abu batu, debu kapur, dan abu terbang, digunakan terutama untuk

memperbaiki gradasi agregat campuran untuk meningkatkan kelecakan (*workability*), mengatur waktu pengikatan (*setting time*). Bahan pengisi harus memenuhi persyaratan SNI 03-6723-2002. Bila diuji dengan pengayakan sesuai SNI ASTM C136-2012, bahan pengisi harus mengandung butiran halus yang lolos ayakan No.16 dan yang lolos ayakan 0,075mm (No. 200) masing-masing tidak kurang dari 100% dan 75% terhadap beratnya. Bahan pengisi yang digunakan maksimum 3% terhadap berat agregat kering [5].

Kadar aspal optimum dalam campuran aspal beton ditentukan dari hasil evaluasi terhadap parameter Marshall, yaitu kadar aspal yang memberikan parameter Marshall seperti stabilitas, *flow*, *VIM*, *VFB*, *density* dan Marshall Quotient sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan [5].

Abu bahan bakar minyak sawit yang dikenal sebagai *POFA* adalah hasil sampingan abu dari pembakaran biomassa pohon sawit[6], termasuk tandan buah sawit kosong, serat, kemel/cangkang, daun sawit di pabrik kelapa sawit. *POFA* idealnya berwarna abu-abu tetapi berubah menjadi hitam tergantung pada proporsi karbon yang tidak terbakar. Persentase karbon tidak terbakar yang lebih tinggi membuat *POFA* menjadi hitam; karenanya pembakaran lebih lanjut pada 1000°C mengembalikan *POFA* menjadi abu-abu. Berat jenis *POFA* berkisar antara 1,89 hingga 2,6, dan memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi, sehingga bersifat pozzolan. Karakteristik dan kandungan kimia *POFA* sangat berbeda, terutama dipengaruhi oleh beberapa faktor yang terdiri dari (i) bagian biomassa yang digunakan dalam produksinya, (ii) lokasi geografis biomassa kelapa sawit, (iii) suhu pembakaran, (iv) ukuran partikel, dan (v) Perlakuan pra atau pasca produksi yang diterapkan [7].

Salah satu komponen penting dalam campuran aspal adalah *filler*, yang mengisi rongga antar agregat untuk meningkatkan kepadatan dan stabilitas campuran. *Filler* konvensional seperti semen dan abu batu sering digunakan, namun material ini memiliki biaya tinggi dan terbatas sumbernya. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk mencari alternatif *filler* yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan. *POFA* dan *Fly Ash* adalah dua jenis limbah industri yang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai *filler* dalam campuran aspal. *POFA* adalah hasil samping dari

pembakaran limbah kelapa sawit, sedangkan *Fly Ash* merupakan limbah dari pembakaran batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pemanfaatan limbah ini tidak hanya mengurangi biaya produksi, tetapi juga membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa *POFA* dan *Fly Ash* memiliki sifat pozzolanik yang baik dan dapat meningkatkan kinerja campuran aspal[8-9] [Click or tap here to enter text..](#) Penelitian Fahmi dkk. menunjukkan bahwa campuran aspal dengan substitusi *Fly Ash* menghasilkan peningkatan parameter Marshall pada persentase tertentu. Penelitian lain juga menyebutkan bahwa *POFA*, karena kandungan silika yang tinggi, dapat meningkatkan stabilitas dan daya tahan aspal. Namun, kombinasi optimal antara *POFA* dan *Fly Ash* sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC masih memerlukan penelitian lebih lanjut [4].

Hasil penelitian Fahmi dkk, pengaruh karakteristik Marshall pada campuran Laston AC-WC dengan substitusi *filler Fly Ash* pada kadar 25% dan 50%. Analisis berdasarkan informasi yang dari penelitian tersebut Pada kadar *Fly Ash* 25% diperoleh parameter marshall yang memenuhi syarat berturut-turut *VIM*: 3,97%, *VMA*: 23,37%, *VFA*: 83,40%, *Flow*: 4,54%, sedangkan yang tidak memenuhi syarat adalah Stabilitas: 595,38 kg dan *Marshall Quotient*: 130,39 kg/mm. Selanjutnya pada kadar *Fly Ash* 50% parameter marshall yang memenuhi syarat berturut-turut; *VIM*: 3,79%, *VMA*: 21,17%, *VFA*: 82,11%, *Flow*: 4,59%, sedangkan yang tidak memenuhi syarat adalah Stabilitas: 561,08 kg dan *Marshall Quotient*: 122,29 kg/mm. Meskipun campuran memenuhi beberapa kriteria seperti *VIM*, *VMA*, *VFA*, dan *Flow*, performa campuran dalam hal stabilitas dan *Marshall Quotient* masih perlu ditingkatkan agar memenuhi standar yang diharapkan. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *Fly Ash* pada kadar 25% dan 50% memberikan hasil yang hampir mirip dalam hal karakteristik Marshall, tetapi kedua campuran masih kurang stabil dan memiliki kekuatan kompresi yang lebih rendah dari yang diharapkan [4].

Penelitian sebelumnya menggunakan abu batu bara sebagai bahan pengisi[10] dalam campuran aspal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan abu batu bara memiliki nilai karakteristik Marshall yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran aspal normal.

Rata-rata nilai karakteristik Marshall campuran dengan abu batu bara berada di atas campuran aspal normal. Persentase abu batu bara yang direkomendasikan adalah 2%. Campuran aspal dengan tambahan abu batu bara ini cocok digunakan untuk jalan dengan LHR (Lalu Lintas Rencana) tinggi dan muatan kendaraan berat. Nilai Kadar Optimum Aspal (KAO) untuk campuran aspal normal: 6,65%, sedangkan untuk campuran dengan penambahan abu batu bara: 1% abu batu bara: KAO 6,90%, 1,5% abu batu bara: KAO 6,90%. 2% abu batu bara: KAO 6,95%. Penambahan abu batu bara hingga 2% pada campuran aspal memberikan peningkatan nilai KAO yang sedikit namun signifikan. Campuran dengan abu batu bara menunjukkan potensi meningkatkan karakteristik Marshall, yang mengindikasikan kemungkinan peningkatan dalam stabilitas dan kekuatan campuran aspal. Peneliti menyarankan bahwa abu batu bara dapat efektif digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran laston lapis aus dengan persentase optimal sekitar 2%. Hal ini dapat meningkatkan performa campuran aspal terutama untuk kondisi jalan dengan lalu lintas tinggi dan beban kendaraan berat [11].

Penelitian dengan penggunaan *POFA* dan semen sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC dengan substitusi *POFA* dan semen sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC menghasilkan peningkatan karakteristik Marshall seiring dengan peningkatan persentase *POFA*. *POFA* dapat digunakan sebagai pengganti *filler* semen atau *filler* lainnya, terutama pada campuran yang tidak terpapar air laut. Penggunaan *filler POFA* 100% memberikan nilai Marshall yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan semen 100%. Namun, ketahanan terhadap kadar garam (pengaruh air laut) menurun seiring dengan peningkatan persentase *POFA*. Keunggulan *POFA* sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC menunjukkan bahwa *POFA* secara umum memberikan karakteristik Marshall yang lebih baik daripada semen. Meskipun *POFA* memberikan keunggulan dalam karakteristik Marshall, pengaruh terhadap ketahanan terhadap kadar garam menurun seiring dengan peningkatan persentase *POFA*. Penggunaan *POFA* sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC dapat meningkatkan karakteristik Marshall secara signifikan. Namun, perlu diperhatikan bahwa penggunaan *POFA* juga berpotensi mengurangi ketahanan terhadap kadar garam,

sehingga perlu dipertimbangkan kondisi lingkungan dan aplikasi penggunaannya [12].

Namun, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa meskipun *POFA* dan *Fly Ash* memiliki potensi yang besar sebagai *filler*, penggunaan keduanya dalam campuran aspal masih belum dieksplorasi secara maksimal. Beberapa penelitian hanya menguji penggunaan salah satu dari keduanya tanpa melihat kombinasi optimal antara *POFA* dan *Fly Ash* dalam meningkatkan karakteristik Marshall campuran aspal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi *gap* tersebut dengan mengkombinasikan *POFA* dan *Fly Ash* sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC dan mengevaluasi pengaruhnya terhadap berbagai parameter Marshall seperti stabilitas, *flow*, *VIM*, *VMA*, dan *Marshall Quotient*. Solusi yang diusulkan dalam penelitian ini dapat memberikan alternatif *filler* yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan efektif untuk meningkatkan kualitas perkerasan jalan, tanpa mengurangi kinerja teknis yang diharapkan.

Dengan demikian, nilai kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini adalah merupakan evaluasi pertama terhadap kombinasi *POFA* dan *Fly Ash* sebagai *filler* dalam campuran aspal AC-BC, sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2.

## 2. Metode

Penelitian ini menggunakan material utama berupa agregat kasar, agregat halus, aspal penetrasi 60/70, serta *filler POFA* dan *Fly Ash*. Agregat kasar dan halus diperoleh dari sumber lokal dan diuji untuk memastikan bahwa distribusi ukuran partikel dan kualitas fisiknya sesuai dengan standar Bina Marga 2018 Revisi 2. Sementara itu, *POFA* diperoleh dari limbah pembakaran kelapa sawit di pabrik kelapa sawit di Aceh, dan *Fly Ash* berasal dari limbah pembakaran batu bara di PLTU Pangkalan Susu, Sumatera Utara. Sebelum digunakan, semua material diuji untuk memastikan kesesuaian dan kualitasnya dengan standar teknis yang berlaku.

### 2.1 Persiapan Material

Persiapan material dimulai dengan pengujian agregat untuk mengetahui karakteristik fisik dan mekaniknya. Agregat diuji berat jenis, kadar air, serta distribusi ukuran partikel. Uji berat jenis dilakukan untuk menentukan densitas agregat, yang merupakan

faktor penting dalam menentukan kepadatan campuran aspal. Kadar air agregat diuji untuk memastikan bahwa material tidak memiliki kelembaban berlebih yang dapat mempengaruhi proses pencampuran aspal. Pengujian ini dilakukan di laboratorium Jalan Raya pada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe dengan menggunakan peralatan standar yang telah ditetapkan dalam spesifikasi Bina Marga.

Setelah agregat dinyatakan sesuai, *filler POFA* dan *Fly Ash* dipersiapkan. Dari data sekunder *Filler* ini telah diuji untuk kandungan kimiawinya, khususnya kandungan silika, yang merupakan indikator sifat pozzolaniknya. *POFA* yang berasal dari pembakaran kelapa sawit mengandung silika tinggi, yang berpotensi meningkatkan kinerja aspal dalam menahan deformasi plastis. *Fly Ash*, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara juga memiliki sifat pozzolanik, dan telah digunakan secara luas sebagai *filler* dalam campuran aspal. Pengujian awal ini dilakukan untuk memastikan bahwa kedua bahan *filler* tersebut layak digunakan dan dapat meningkatkan performa campuran aspal.

## 2.2 Pencampuran Material

Proses pencampuran dilakukan dengan menggunakan metode pencampuran panas, di mana agregat dan *filler* dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu 150-160°C. Suhu ini dipilih untuk memastikan bahwa aspal mencair dengan baik dan dapat tercampur secara merata dengan agregat dan *filler*. Pencampuran dilakukan dengan alat pencampur aspal yang dirancang untuk memastikan distribusi yang merata dari setiap komponen dalam campuran. Pada tahap ini, berbagai komposisi *filler* diuji, yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% *POFA*, dengan kombinasi *Fly Ash* sebagai pengganti *filler* konvensional.

## 2.3 Pemadatan dan Pembentukan Sampel

Setelah pencampuran, campuran aspal dimasukkan ke dalam cetakan silinder dengan diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm. Proses pemadatan dilakukan menggunakan alat tumbukan Marshall, di mana setiap sisi benda uji dipadatkan sebanyak 75 kali. Pemadatan ini penting untuk mencapai kepadatan maksimal, yang mensimulasikan kondisi di lapangan di

mana campuran aspal dipadatkan secara mekanis untuk menahan beban lalu lintas. Proses ini juga penting untuk menentukan stabilitas dan kekakuan campuran aspal. Setelah dipadatkan, benda uji didiamkan selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian.

## 2.4 Pengujian Marshall

Setelah proses pemadatan, pengujian *Marshall* dilakukan untuk mengukur beberapa parameter kunci dari campuran aspal. Stabilitas digunakan untuk mengukur ketahanan campuran terhadap beban, dengan nilai yang lebih tinggi menunjukkan daya dukung yang lebih baik. *Flow* mengukur deformasi plastis yang terjadi saat campuran menerima beban, dengan nilai yang lebih rendah menunjukkan deformasi yang lebih sedikit. Parameter *VIM* digunakan untuk menentukan jumlah rongga udara dalam campuran, yang berkaitan dengan kepadatan dan ketahanan terhadap infiltrasi air. *VMA* mengukur volume rongga antar agregat, sementara *Void Filled with Bitumen (VFB)* menunjukkan seberapa banyak rongga yang diisi oleh aspal.

Pengujian *VIM* dan *VMA* penting karena kedua parameter ini berkaitan dengan daya tahan campuran terhadap kelembaban dan infiltrasi air, yang dapat mempengaruhi umur panjang campuran aspal. *VFB*, yang menunjukkan seberapa baik rongga antar agregat terisi oleh aspal, berperan penting dalam menjaga kekuatan dan stabilitas campuran dalam kondisi lalu lintas berat. *Marshall Quotient (MQ)*, yang dihitung sebagai rasio antara stabilitas dan *flow*, digunakan untuk mengevaluasi kekakuan campuran. Semakin tinggi nilai MQ, semakin kaku campuran, yang berarti lebih tahan terhadap deformasi plastis.

## 2.5 Analisis Data

Semua data yang diperoleh dari pengujian *Marshall* dianalisis untuk melihat pengaruh variasi *filler POFA* dan *Fly Ash* terhadap kinerja campuran aspal. Setiap komposisi *filler* diplot dalam bentuk tabel untuk melihat hubungan antara variasi *filler* dan performa campuran. Analisis ini membantu mengidentifikasi komposisi *filler* yang memberikan stabilitas, kekakuan, dan durabilitas optimal, serta

menyesuaikan dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk menilai apakah campuran yang diuji memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan.

### 2.6 Validitas dan Reliabilitas Data

Untuk memastikan validitas dan reliabilitas data, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasi filler, dan rata-rata dari tiga pengujian diambil untuk dianalisis. Tabulasi hubungan antara filler *POFA* dan *Fly Ash* dengan stabilitas, *flow*, *VIM*, *VMA*, *VFB*, dan *MQ* dipresentasikan untuk mengidentifikasi pola dan tren dalam data.

Dengan mempertimbangkan hasil analisis data dan perbandingan dengan spesifikasi yang berlaku, akan diperoleh rekomendasi mengenai penggunaan *POFA* dan *Fly Ash* sebagai *filler* dalam campuran aspal *AC-BC*.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian mengenai penggunaan *filler POFA* dan *Fly Ash* dalam campuran aspal panas, khususnya dalam jenis campuran *AC-BC*. Parameter sifat fisik yang diuji meliputi tingkat penyerapan air dan berat jenis agregat. Tabel 1 berikut menyajikan hasil pengujian untuk *split*, *screen*, *dust*, dan pasir.

Tabel 1. Data hasil pengujian sifat fisis agregat

No	Jenis Agregat	Penyerapan		Berat Jenis	
		Hasil	Spesifikasi	Hasil	Spesifikasi
1	<i>Split</i>	1,36	<3% Berat	2,67	≥2,50
2	<i>Screen</i>	1,60	<3% Berat	2,62	≥2,50
3	<i>Dust Stone</i>	1,49	<3% Berat	2,50	≥2,50
4	Pasir	2,18	<3% Berat	2,61	≥2,50

Tabel 1 menunjukkan hasil penelitian mengenai penyerapan dan berat jenis agregat yang digunakan dimana memiliki spesifikasi penyerapan kurang dari 3% berat. Hasil pengujian penyerapan menunjukkan nilai terendah pada *split* sebesar 1,36% dan nilai tertinggi pada pasir sebesar 2,18%. Sedangkan untuk berat jenis, semua agregat memenuhi spesifikasi dengan hasil  $\geq 2,50$ . *Split* memiliki berat jenis sebesar 2,67, *Screen* 2,62, *Dust* 2,50, dan Pasir 2,61. Semua jenis agregat yang diuji memenuhi spesifikasi yang ditetapkan baik dalam hal penyerapan maupun berat jenis.

Pengujian marshall yang dilakukan pada variasi kadar aspal ideal untuk benda uji Pb, maka diperoleh nilai stabilitas, *flow*, *VIM*, *VFB* (rongga terisi aspal), *VMA* (rongga dalam agregat), dan *Marshall Quotient*. Hasil pengujian marshall untuk benda uji campuran aspal *AC-BC* dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan analisis data pada Tabel 2. Pada kadar ini, stabilitas mencapai 1421 kg, yang merupakan nilai tertinggi dan jauh di atas batas minimum 800 kg yang disyaratkan. Nilai *flow* sebesar 3,7 mm juga berada dalam kisaran yang ideal (2-4 mm), sementara *VIM* tercatat sebesar

4,4%, memenuhi kisaran 3,0-5,0%. Selain itu, *VMA* sebesar 15,6% juga memenuhi spesifikasi minimum 14%, dan *VFB* tercatat sebesar 80,1%, yang menunjukkan rongga agregat terisi dengan baik oleh aspal. Nilai *Marshall Quotient* pada kadar 5,8% sebesar 431,6 kg/mm menunjukkan kekakuan campuran yang optimal, jauh di atas spesifikasi minimum 250 kg/mm, sehingga dapat disimpulkan bahwa kadar aspal optimum (*KAO*) diperoleh pada kadar aspal 5,59%.

Hasil pengujian menunjukkan bagaimana perubahan komposisi *POFA* dan *Fly Ash* memengaruhi stabilitas, *flow*, *VIM*, *VMA*, *Void Filled with Bitumen (VFB)*, serta *Marshall Quotient (MQ)*. Setiap parameter memberikan gambaran yang berbeda mengenai kinerja campuran aspalnya.

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian Marshall pada campuran aspal *AC-BC* dengan berbagai variasi komposisi *filler POFA* dan *Fly Ash*. Parameter yang diuji meliputi stabilitas, *flow*, *VIM*, *VMA*, *Void Filled with Bitumen (VFB)*, serta *Marshall Quotient (MQ)*. Variasi komposisi *filler* dimulai dari 0% *POFA* hingga 100% *POFA* yang dikombinasikan dengan *Fly Ash*. Berdasarkan hasil pengujian, dapat dilihat

bahwa penggunaan *POFA* dalam campuran memberikan peningkatan signifikan pada stabilitas campuran, terutama pada komposisi 100% *POFA*, di mana nilai stabilitas mencapai 2697 kg dengan *Marshall Quotient* tertinggi sebesar 842,8 kg/mm. Sementara itu, nilai *flow*

tetap berada dalam rentang yang diizinkan oleh spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Peningkatan *VIM* dan *VMA* juga terjadi seiring dengan meningkatnya proporsi *POFA*, meskipun nilai ini masih berada dalam batas yang diperbolehkan.

Tabel 2. Hasil pengujian marshall pada kadar aspal (Pb)

No	Parameter <i>Marshall</i>	Variasi Kadar Aspal					Spesifikasi Umum 2018
		4,3%	4,8%	5,3%	5,8%	6,3%	
1	Stabilitas (kg)	1288	1379	1318	1421	1309	Min. 800
2	Flow (mm)	3,1	3,2	3,3	3,7	3,4	2-4
3	<i>VIM</i> (%)	5,0	4,9	4,7	4,4	3,9	3,0-5.0
4	<i>VMA</i> (%)	13,0	13,9	14,8	15,6	16,2	Min. 14
5	<i>VFB</i> (%)	82,0	81,2	80,5	80,1	79,9	Min. 65
6	<i>Marshall Quotient</i>	391,6	388,3	399,9	431,6	420,2	Min. 250

Tabel 3. Nilai variasi marshall berdasarkan *POFA* dan Fly Ash

No	Persentase <i>POFA</i> dan Fly Ash	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	<i>VIM</i> (%)	<i>VMA</i> (%)	<i>VFB</i> (%)	MQ (kg/mm)
1	PF0%+FA100%	2051	3,30	4,30	15,00	80,80	621,5
2	PF20%+FA80%	1986	3,60	4,40	15,10	80,50	551,7
3	PF40%+FA60%	1560	3,20	4,70	15,40	79,90	487,5
4	PF60%+FA40%	1588	3,20	4,90	15,50	79,60	496,3
5	PF80%+FA20%	1792	3,10	5,00	15,60	79,40	578,1
6	PF100%+FA0%	2697	3,20	5,00	15,60	79,40	842,8

Beberapa variabel pengujian Marshall yang telah dilakukan seperti ditunjukkan pada Tabel 3 diuraikan seperti berikut ini.

### 3.1 Stabilitas

Hasil pengujian menunjukkan bahwa stabilitas campuran aspal *AC-BC* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya komposisi *POFA* dalam campuran. Pada variasi *filler* 100% *POFA*, stabilitas mencapai nilai tertinggi sebesar 2697 kg. Sementara itu, campuran dengan 100% *Fly Ash* menghasilkan stabilitas yang lebih rendah, yaitu sekitar 1560 kg. Hal ini menunjukkan bahwa *POFA* memiliki peran yang signifikan dalam meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap beban. Stabilitas tertinggi yang dicapai pada komposisi 100% *POFA* menunjukkan bahwa *POFA* memberikan struktur yang lebih solid dalam campuran, yang membuatnya mampu menahan deformasi akibat beban lalu lintas lebih baik dibandingkan dengan *Fly Ash*. Kombinasi antara *POFA* dan *Fly Ash* juga menunjukkan tren stabilitas yang relatif baik, dengan nilai yang

meningkat ketika proporsi *POFA* lebih tinggi dibandingkan *Fly Ash*.

Peningkatan stabilitas dan kekakuan campuran aspal *AC-BC* yang menggunakan *POFA* sebagai *filler* dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui kandungan silika tinggi dan struktur fisik halus dari *POFA*. Meskipun reaksi pozzolanik seperti yang terjadi dalam beton tidak berlangsung dalam campuran aspal, sifat fisik dan kimia *POFA*, termasuk kekakuan partikel dan kemampuannya mengisi rongga mikro, meningkatkan kepadatan campuran dan memperkuat ikatan antara agregat dan aspal. Hal ini pada akhirnya meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi plastis di bawah beban. Pernyataan ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa material dengan kandungan silika tinggi, seperti *fly ash* dan *POFA*, dapat meningkatkan kekakuan dan performa mekanik campuran aspal [13]. Selanjutnya didukung oleh *Fly Ash* memiliki sifat-sifat yang menguntungkan sebagai pengisi karena partikelnya yang bulat, kaca, dan licin dengan intensitas sinyal yang kuat dalam kandungan Si, Al, dan O [14].

### 3.2 Flow

*Flow* merupakan parameter yang mengukur deformasi plastis campuran aspal ketika diberikan beban [15]. Pada campuran dengan variasi 100% *POFA*, nilai *flow* yang dihasilkan adalah sekitar 3,1 mm, yang masih berada dalam kisaran yang disyaratkan oleh spesifikasi Bina Marga (2-4 mm). Sementara itu, campuran dengan 100% *Fly Ash* menghasilkan *flow* yang lebih tinggi, yaitu sekitar 3,4 mm. Kombinasi *filler* dengan proporsi *POFA* lebih tinggi menunjukkan nilai *flow* yang lebih rendah dan stabil, yang mengindikasikan bahwa campuran ini memiliki tingkat deformasi plastis yang lebih kecil dibandingkan dengan campuran yang memiliki *Fly Ash* dalam jumlah besar. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa *POFA* berkontribusi pada kekakuan campuran yang lebih baik dibandingkan *Fly Ash*, sehingga mampu mengurangi deformasi di bawah beban.

### 3.3 VIM (Void in Mix)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan komposisi *POFA* dalam campuran juga menyebabkan peningkatan *VIM*. Pada campuran dengan 100% *POFA*, nilai *VIM* mencapai 5,0%, sementara campuran dengan 100% *Fly Ash* memiliki nilai *VIM* yang lebih rendah, yaitu sekitar 4,2%. Nilai *VIM* yang lebih tinggi pada campuran *POFA* menunjukkan bahwa campuran ini memiliki lebih banyak rongga udara, yang dapat mempengaruhi kepadatan campuran. Meskipun *VIM* yang lebih tinggi dapat meningkatkan risiko masuknya air dan udara ke dalam campuran, nilai ini masih berada dalam batas yang dapat diterima oleh spesifikasi Bina Marga (3-5%). Oleh karena itu, penggunaan *POFA* tetap memenuhi standar, meskipun perlu perhatian lebih terhadap ketahanan campuran terhadap air dan kelembaban.

Peningkatan nilai *VIM* tersebut seiring dengan meningkatnya proporsi *POFA* dalam penelitian ini dapat dijelaskan oleh karakteristik partikel *POFA* yang memiliki bentuk *spherical* (bulat) dengan permukaan menggumpal dan kasar (*agglomerate and rough*) [16]. Permukaan yang kasar ini cenderung menghasilkan gesekan yang lebih tinggi antar partikel, sehingga menyulitkan pemadatan campuran dan meningkatkan volume rongga udara.

### 3.4 VMA (Void in Mineral Aggregate)

*VMA* mengukur volume rongga antar agregat dalam campuran aspal. Berdasarkan hasil pengujian, campuran dengan komposisi 100% *POFA* menunjukkan nilai *VMA* sebesar 15,6%, yang sedikit lebih tinggi dari campuran dengan 100% *Fly Ash* yang menghasilkan nilai *VMA* sebesar 14,2%. Peningkatan *VMA* ini menunjukkan bahwa *POFA* memiliki efek dalam meningkatkan volume rongga antar agregat, yang dapat berdampak pada kemampuan aspal untuk mengisi rongga dengan baik. Nilai *VMA* yang lebih tinggi juga menunjukkan bahwa campuran *POFA* dapat memberikan lebih banyak ruang untuk penyerapan aspal, yang penting untuk menjaga kestabilan dan daya tahan campuran dalam jangka panjang.

### 3.5 Marshall Quotient (MQ)

*Marshall Quotient* adalah rasio antara stabilitas dan *flow*, yang menggambarkan kekakuan campuran. Campuran dengan komposisi 100% *POFA* menghasilkan nilai *MQ* sebesar 391,6 kg/mm, yang menunjukkan kekakuan campuran yang baik. Sebaliknya, campuran dengan 100% *Fly Ash* memiliki nilai *MQ* yang lebih rendah, yaitu 358,4 kg/mm. Hal ini menunjukkan bahwa campuran dengan *POFA* memiliki kekakuan yang lebih baik dan mampu menahan deformasi yang lebih kecil dibandingkan dengan campuran yang menggunakan *Fly Ash* sebagai *filler*. Kombinasi *POFA* dan *Fly Ash* dalam proporsi tertentu juga menunjukkan nilai *MQ* yang relatif stabil, namun tren yang jelas menunjukkan bahwa peningkatan *POFA* meningkatkan kekakuan campuran.

Penggunaan *POFA* sebagai *filler* dalam campuran aspal *AC-BC* memberikan peningkatan yang signifikan terhadap stabilitas dan kekakuan campuran dibandingkan dengan *Fly Ash*. *POFA* dengan kandungan silika yang tinggi, mampu memberikan sifat *pozzolanik* yang meningkatkan interaksi antar agregat dan aspal, menghasilkan campuran yang lebih stabil dan tahan terhadap deformasi plastis. Meskipun nilai *VIM* pada campuran *POFA* sedikit lebih tinggi, nilai ini masih berada dalam batas yang diizinkan oleh spesifikasi Bina Marga, sehingga tidak mengurangi performa campuran secara keseluruhan. Penggunaan kombinasi *POFA* dan *Fly Ash* juga dapat memberikan alternatif yang efisien untuk *filler* konvensional, dengan tetap memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa *POFA* dapat menjadi alternatif *filler* yang efektif dalam campuran aspal *AC-BC*, dengan performa yang lebih baik dibandingkan dengan *Fly Ash*. Namun, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengatasi potensi peningkatan *VIM* yang terjadi pada penggunaan *POFA*, khususnya dalam hal ketahanan campuran terhadap kelembaban dan air.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan *POFA* sebagai *filler* dalam campuran *AC-BC* memberikan peningkatan signifikan dibandingkan *fly ash*. Pengujian Marshall menunjukkan bahwa komposisi 100% *POFA* menghasilkan stabilitas dan kekakuan tertinggi, terlihat dari nilai *MQ* yang lebih baik. Meskipun nilai *VIM* pada campuran *POFA* lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash*, hasilnya tetap dalam batas yang dapat diterima.

Penggunaan *POFA* juga meningkatkan *VMA*, yang mengindikasikan peningkatan volume rongga antar agregat dalam campuran, sehingga distribusi aspal menjadi lebih optimal. Meskipun kombinasi *POFA* dan *fly ash* dapat memberikan hasil yang seimbang, *POFA* menunjukkan performa lebih unggul dalam hal stabilitas dan kekakuan campuran.

Secara umum, baik *POFA* maupun *fly ash* dapat digunakan secara tunggal ataupun dikombinasikan sebagai *filler* dalam campuran *AC-BC*. Campuran dengan 100% *POFA* terbukti memberikan stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan 100% *fly ash*, menunjukkan bahwa *POFA* lebih efektif dalam meningkatkan kinerja campuran aspal.

Seluruh variasi komposisi *POFA* dan *fly ash* memenuhi syarat karakteristik Marshall yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, termasuk stabilitas, *flow*, *VIM*, *VMA*, *VFB*, dan *MQ*. Dengan demikian, *POFA* dapat dijadikan alternatif *filler* yang efektif dan ramah lingkungan dalam campuran aspal *AC-BC*.

Setelah dilakukan review terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan *Fly Ash* sebagai *filler* dalam campuran aspal. Meskipun *Fly Ash* telah terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *POFA* memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan *Fly Ash*, terutama dalam meningkatkan stabilitas dan *Marshall Quotient (MQ)*. Hasil ini

bertentangan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang lebih menekankan pada efektivitas *Fly Ash*, namun penelitian ini memberikan bukti kuat bahwa *POFA* bisa menjadi alternatif yang lebih efisien dan ekonomis.

Namun, untuk aplikasi lebih lanjut, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengatasi potensi peningkatan nilai *VIM* yang ditemukan dalam campuran *POFA*, terutama terkait ketahanan terhadap kelembaban dan air.

#### Daftar Pustaka

- [1] Sassani, A., Smadi, O., & Hawkins, N., 2021. *Developing pavement marking management systems: A theoretical model framework based on the experiences of the us transportation agencies*. Infrastructures, Vol. 6, No. 2, p. 18.
- [2] Almeida, A. & Picado-Santos, L., 2022. *Asphalt road pavements to address climate change challenges—an overview*. Applied Sciences, Vol. 12, No. 24, p. 12515.
- [3] Sukarman, S., 2003. *Beton aspal campuran panas*. Yayasan Obor Indonesia.
- [4] Fahmi, A. K., 2021. *Karakteristik campuran beton aspal (ac-wc) dengan menggunakan variasi kadar filler limbah abu terbang batubara*. Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK), Vol. 2, No. 1, pp. 51-57.
- [5] Marga, B., 2010. *Spesifikasi umum 2018*. Direktorat Jendral Bina Marga, Vol. 2010, pp. 1-6.
- [6] Opiso, E. M., Tabelin, C. B., Maestre, C. V., Aseniero, J. P. J., Arima, T., & Villacorte-Tabelin, M., 2023. *Utilization of palm oil fuel ash (pofa) as an admixture for the synthesis of a gold mine tailings-based geopolymer composite*. Minerals, Vol. 13, No. 2, p. 232.
- [7] Usman, K. R., Hainin, M. R., Satar, M. K. I. M., Warid, M. N. M., Kamarudin, S. N. N., & Abdulrahman, S., 2021. *Palm oil fuel ash application in cold mix dense-graded bituminous mixture*. Construction and Building Materials, Vol. 287, p. 123033.
- [8] Klarens, K., Indranata, M., Antoni, A., & Hardjito, D., 2016. *Pemanfaatan bottom ash dan fly ash tipe c sebagai bahan pengganti dalam pembuatan paving block*. Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil, Vol. 5, No. 2.

- [9] Amran, M. *et al.*, 2021. *Palm oil fuel ash-based eco-friendly concrete composite: A critical review of the long-term properties*. *Materials*, Vol. 14, No. 22, p. 7074.
- [10] Mohammed, S. A. *et al.*, 2021. *A review of the utilization of coal bottom ash (cba) in the construction industry*. *Sustainability*, Vol. 13, No. 14, p. 8031.
- [11] Al Qurny, A. U., Puspito, I. H., & Tinumbia, N., 2022. *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.
- [12] Syaifuddin, S., Kurniati, K., Aiyub, A., Miswar, M., Amiruddin, I. P. B., & Daulay, P. K. N., Year. *Studi karakteristik aspal ac-bc dan resistensi terhadap infiltrasi air laut dengan pofa sebagai filler*. in *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, Vol. 7, No. 1.
- [13] Mirković, K., Tošić, N., & Mladenović, G., 2019. *Effect of different types of fly ash on properties of asphalt mixtures*. *Advances in civil engineering*, Vol. 2019, No. 1, p. 8107264.
- [14] Mulizar *et al.*, 2023. *Effect of Calcination on The Chlorine Content in The Sidoarjo Mud-Based Geopolymers*. *Journal of Southwest Jiaotong University*, Vol. 58, No. 5,
- [15] Khalifah, R., Souliman, M. I., & Bajusair, M. B. M., 2023. *Development of prediction model for rutting depth using artificial neural network*. *CivilEng*, Vol. 4, No. 1, pp. 174-184.
- [16] Fauzi, A., 2020. *Effect of pofa as a replacement material on fly ash based geopolymer mortar*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 854, No. 1: IOP Publishing.