



Terbit online pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Analisis Morfologi Permukaan Pada Campuran *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC) Yang Mengandung *Fly Ash Bottom Ash* (FABA) Menggunakan *Scanning Electron Microscope*

Erna Agnesa^a, Elizar^b, Mohamad Syahminan^c, Muchammad Zaenal Muttaqin^d

^{a,b,c,d} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Jl.Kaharuddin Nasution No.113, Pekanbaru, 28284, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 01 September 2025

Revisi Akhir: 26 Desember 2025

Diterbitkan Online: 30 Desember 2025

KATA KUNCI

AC-WC

Aspal

Fly Ash Bottom Ash

Morfologi Permukaan

SEM

KORESPONDENSI

Telepon: 081277346603

E-mail: emaagnesa.sgc@gmail.com

ABSTRACT

Fly Ash Bottom Ash (FABA) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan limbah hasil pembakaran dari pabrik kelapa sawit (PKS), yang berpotensi digunakan sebagai material alternatif dalam campuran aspal panas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis morfologi permukaan campuran *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC) yang mengandung FABA sebagai *filler* menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Metode penelitian yang digunakan dengan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen dilaboratorium. Variasi FABA yang digunakan sebagai *filler* sebesar 0%, 0,5%, 1%, 1,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan FABA dapat memperbaiki ikatan antar aspal dan agregat melalui peningkatan adhesi, yang terlihat dari distribusi partikel *filler* yang lebih merata. Analisis SEM menunjukkan adanya perubahan tekstur permukaan, peningkatan kekompakan ikatan agregat, serta interaksi kimia dengan adanya unsur Si, Al, dan Ca yang berperan dalam memperkuat ikatan Aspal dan FABA. Sehingga dapat disimpulkan bahwa FABA dapat dimanfaatkan sebagai *filler* alternatif dalam campuran AC-WC dengan potensi meningkatkan kinerja struktural dan keberlanjutan lingkungan.

1. PENDAHULUAN

Lapis aus (*Wearing Course*) lapisan teratas yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan, berfungsi untuk menahan beban lalu lintas, memberikan permukaan yang rata dan tahan terhadap aus serta cuaca buruk [1]

Fly ash dimanfaatkan sebagai pengganti Semen *Portland*. Selain itu abu terbang batu bara dapat dijadikan sebagai mineral *filler* dikarenakan mengandung unsur *pozzolan* sehingga dapat berfungsi sebagai bahan pengisi rongga dan pengikat aspal beton [2] *Bottom ash* merupakan bahan buangan dari proses pembakaran batu bara yang mempunyai ukuran partikel lebih besar dan lebih berat dari *fly ash*. Penggunaan FABA ini tidak hanya mendukung konsep material berkelanjutan, tetapi juga

dapat mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya alam yang terbatas [3]

Metode penelitian menggunakan benda uji aspal yang telah dilakukan uji *marshall*. Benda uji tersebut dilakukan penelitian lanjutan menggunakan SEM-EDS. pengujian menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk memperkuat hasil analisis karakteristik morfologi permukaan FABA yang digunakan sebagai *filler* pada campuran AC-WC. SEM sendiri merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang mampu menampilkan citra permukaan benda uji melalui proses pemindaian dengan pancaran elektron terfokus, sehingga dapat memperlihatkan detail morfologi hingga skala mikroskopis [4] Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian tentang *analisis morfologi permukaan pada campuran AC-WC yang mengandung FABA menggunakan scanning electron microscope (SEM)* menjadi sangat penting untuk dilakukan. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengkaji efektivitas FABA sebagai bahan alternatif yang berkelanjutan dalam

pengelolaan limbah, tetapi juga untuk memastikan bahwa penggunaannya memenuhi standar ketahanan dan umur layanan perkerasan jalan. Dengan demikian, analisis ini diharapkan menjadi landasan ilmiah yang kuat dalam mendorong pemanfaatan FABA secara lebih luas dalam teknologi perkerasan jalan [5]

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)

Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) merupakan lapisan permukaan (surface course) pada perkerasan lentur yang berfungsi sebagai lapisan aus dan kontak langsung dengan lalu lintas. Lapisan ini berperan penting dalam memberikan kenyamanan, keamanan, serta melindungi lapisan di bawahnya dari kerusakan akibat beban kendaraan dan pengaruh cuaca. AC-WC biasanya menggunakan agregat kasar, agregat halus, filler, dan aspal sebagai bahan pengikat. Karakteristik utama dari AC-WC adalah memiliki tekstur permukaan yang halus namun cukup kasar untuk memberikan gesekan (skid resistance) yang baik, kedap air untuk mencegah masuknya air ke lapisan bawah, serta cukup kuat untuk menahan beban berulang dari kendaraan [6]

2.2. Filler

Filler merupakan material berbutir sangat halus dengan ukuran lolos saringan No. 200 (0,075 mm) yang digunakan dalam campuran beraspal panas (*Hot Mix Asphalt*). Peran filler sangat penting karena berfungsi mengisi rongga di antara butiran agregat halus, sehingga dapat meningkatkan kepadatan campuran, mengurangi porositas, serta memperkuat ikatan antara aspal dan agregat. Kehadiran filler juga memengaruhi karakteristik Marshall, seperti stabilitas, flow, dan nilai Marshall Quotient [7]

2.3. Fly Ash Bottom Ash (FABA)

Fly Ash Bottom Ash (FABA) merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) maupun dari limbah Pabrik Kelapa Sawit (PKS) yang menggunakan proses pembakaran. Fly ash berbentuk serbuk halus berwarna abu-abu dengan ukuran partikel sangat kecil, sedangkan bottom ash memiliki ukuran lebih kasar, berbentuk butiran berpori dan berwarna hitam keabu-abuan. Kedua material ini dikategorikan sebagai limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) jika tidak dikelola dengan baik, namun memiliki potensi besar sebagai material alternatif dalam konstruksi, khususnya sebagai filler dan substitusi sebagian agregat dalam campuran beraspal panas [8]

Secara kimia, FABA mengandung senyawa utama berupa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO) yang memiliki sifat pozzolanik. Kandungan silika dan alumina berperan dalam meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat, sedangkan kalsium oksida dapat membantu memperkuat ikatan kimia dalam campuran [9] Karakteristik inilah yang membuat FABA mampu memperbaiki stabilitas, meningkatkan kekompakan, serta mengurangi porositas campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) [10]

3. METODOLOGI

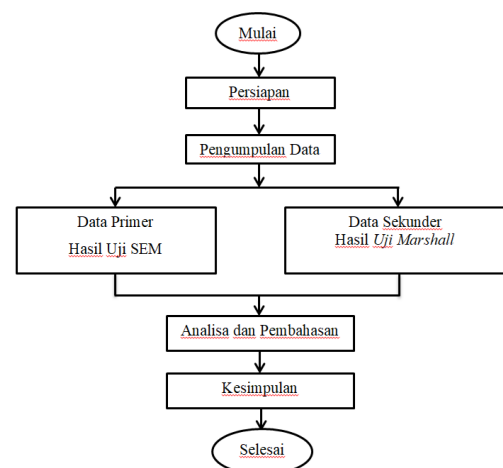
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen di laboratorium. Benda uji yang digunakan merupakan hasil penelitian Candra,WR (2025). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa karakteristik morfologi permukaan FABA yang digunakan sebagai filler dalam campuran AC-WC berdasarkan hasil analisis *scanning electron microscope* (SEM). Pengujian mikroskopis menggunakan SEM, sampel dikirim dan dianalisis di LPPT Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, yang memiliki peralatan SEM JEOL JSM-6510LA dengan fitur *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) yang mendukung analisis mikrostruktur dan komposisi kimia. Peta lokasi dapat dilihat pada gambar 3.1.



Sumber: Google Earth, 2025

Gambar 1. Lokasi Penelitian, LPPT Universitas Gadjah Mada

Penelitian diawali dengan tahap persiapan yang meliputi penentuan objek penelitian, studi literatur, serta penyusunan rencana pengujian. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data yang terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk menganalisis morfologi permukaan material, sedangkan data sekunder berasal dari hasil uji Marshall yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik mekanik campuran. Seluruh data yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibahas secara komprehensif untuk menjawab tujuan penelitian. Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Benda Uji Aspal

Sampel aspal pada penelitian ini berasal dari hasil pengujian *Marshall* yang telah dilakukan oleh Wan Rieko Candra, (2025) di Laboratorium Jalan Raya Universitas Islam Riau, sesuai dengan metode Bina Marga 2018. Kemudian dilakukan pengamatan sampel aspal menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) EDS di laboratorium EPMA ERIC Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta untuk menganalisis morfologi permukaan aspal yang mengandung *fly ash bottom ash* (FABA) sebagai *filler* dengan variasi 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%. Benda uji aspal hasil uji marshall dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 2. benda Uji Marshall

4.2. Hasil Uji Marshall

Hasil uji *Marshall* digunakan sebagai acuan untuk menilai apakah campuran telah memenuhi kriteria teknis yang disyaratkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk campuran AC-WC. Parameter utama yang diuji, yaitu Stabilitas, *Flow*, *Marshall Quotient* (MQ), *Void In Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled With Bitumen* (VFB).

Tabel 1. Hasil Uji Marshall

Variasi FABA (%)	Stabilitas Marshall (kg)	Flow (mm)	Marshall Quotient (kg/mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Keterangan
	≥ 800	2-4	≥ 250	3-5	≥ 15	65-75	
Normal	1390.2	3.18	436.71	4.920	16.572	70.311	Memenuhi
Faba 0.5 %	1451.3	3.22	451.18	4.64	16.326	71.580	Memenuhi
Faba 1%	1969.9	3.57	552.31	4.10	15.852	74.138	Memenuhi
Faba 1.5%	2035.2	3.05	667.28	3.95	15.719	74.886	Memenuhi

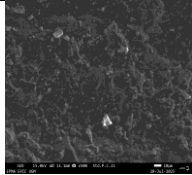
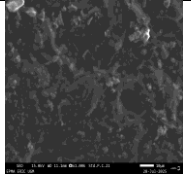
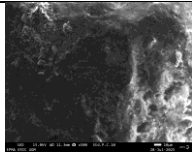
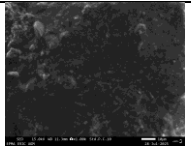
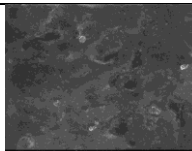
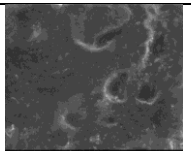
Berdasarkan Tabel 1. Hasil uji *Marshall* menunjukkan bahwa seluruh sampel, baik normal maupun dengan penambahan FABA, memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Pada campuran normal diperoleh stabilitas 1390,2 kg, *flow* 3,18 mm, dan *Marshall Quotient* (MQ) 436,71 kg/mm. Penambahan FABA 0,5% meningkatkan stabilitas menjadi 1451,3 kg dengan MQ 451,18 kg/mm, sedangkan pada kadar 1% stabilitas naik signifikan menjadi 1969,9 kg dengan MQ 552,31 kg/mm. Peningkatan tertinggi dicapai pada kadar FABA 1,5% dengan stabilitas 2035,2 kg dan MQ 667,28 kg/mm. Nilai *flow* seluruh sampel berada dalam rentang spesifikasi (2–4 mm), sementara parameter volumetrik seperti VIM, VMA, dan VFB juga konsisten memenuhi standar. Hal ini menunjukkan bahwa

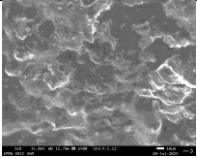
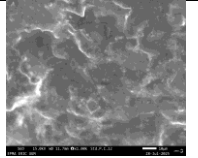
penambahan FABA sebagai *filler* mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan campuran AC-WC, dengan hasil optimal diperoleh pada kadar 1%–1,5% tanpa mengurangi kelenturan maupun memenuhi persyaratan volumetrik

4.3. Hasil Uji Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan penggunaan mikroskop *electron* pada aspal yang bertujuan untuk memperoleh gambar permukaan sampel aspal dengan resolusi tinggi dan mengamati struktur mikroskopis yang terdapat pada aspal. Pada penelitian ini karakteristik aspal yang akan diamati adalah karakteristik aspal yang mengandung FABA 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%.

Tabel 2. Hasil Uji SEM

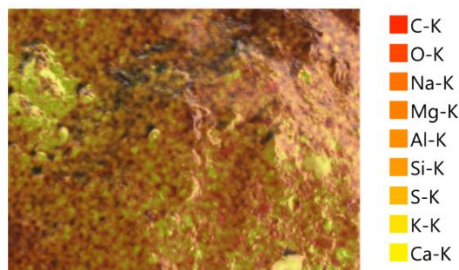
Hasil Gambar SEM	Hasil Gambar SEM	Keterangan
 FABA 0%, Perbesaran 500x	 FABA 0%, Perbesaran 1000x	Pada perbesaran 500x dan 1000x terlihat permukaan campuran masih relatif berongga dengan distribusi partikel yang tidak merata. Beberapa pori terbuka tampak jelas, menunjukkan adanya ruang kosong yang dapat menjadi titik lemah ikatan antara aspal dan agregat
 FABA 0,5%, Perbesaran 500x	 FABA 0,5%, Perbesaran 1000x	Pada perbesaran 500x terlihat partikel FABA mulai mengisi rongga antar-agregat. Hasil perbesaran 1000x menunjukkan distribusi partikel halus yang lebih homogen, meskipun masih terdapat beberapa pori terbuka. Hal ini mengindikasikan adanya peningkatan kekompakan awal akibat penambahan FABA.
 FABA 1%, Perbesaran 500x	 FABA 1%, Perbesaran 1000x	Pada variasi 1%, permukaan campuran terlihat lebih rapat dan homogen baik pada perbesaran 500x maupun 1000x. Partikel FABA mampu menutup sebagian besar pori, sehingga tekstur permukaan lebih padat. Kondisi ini menunjukkan peran FABA dalam meningkatkan ikatan antar komponen melalui pengisian

		rongga dan interaksi kimia.
		Pada perbesaran 500x dan 1000x, permukaan terlihat sangat padat dengan distribusi filler yang merata. Hampir seluruh pori tertutup oleh partikel FABA, menghasilkan morfologi yang lebih kompak dibandingkan kadar sebelumnya.
FABA 1,5%, Perbesaran 500x	FABA 1,5%, Perbesaran 1000x	

Secara keseluruhan, hasil uji SEM menunjukkan bahwa penambahan FABA berpengaruh positif terhadap struktur mikro campuran AC-WC. Semakin tinggi kadar FABA, semakin padat dan homogen morfologi permukaan yang terbentuk, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kekuatan ikatan serta ketahanan terhadap kerusakan

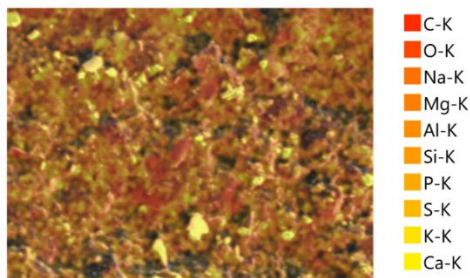
4.4. Hasil Uji Energy Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS)

Uji Energy Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur kimia yang terdapat pada campuran aspal AC-WC dengan variasi penambahan FABA. Hasil analisis EDS menunjukkan bahwa pada campuran tanpa FABA (0%) unsur yang dominan adalah Karbon (C) dan Oksigen (O), yang berasal dari aspal serta material agregat alami. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi awal, campuran masih didominasi oleh senyawa organik aspal dengan sedikit kontribusi mineral.



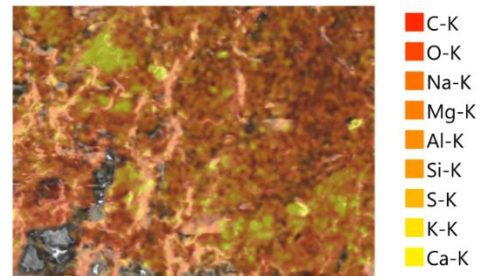
Gambar 3. Hasil Uji EDS FABA 0%.

Seiring dengan penambahan FABA, komposisi unsur mineral mengalami peningkatan yang signifikan. Unsur silikon (Si), aluminium (Al), kalsium (Ca), dan besi (Fe) mulai muncul dalam jumlah yang lebih tinggi. Pada kadar 0,5% FABA, kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) meningkat, yang berperan penting dalam memperkuat ikatan antar partikel.



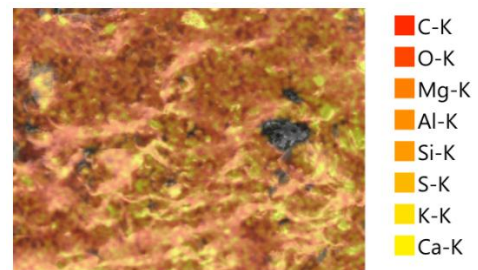
Gambar 4. Hasil Uji EDS FABA 0,5%.

Pada variasi 1% FABA, EDS menunjukkan kandungan mineral yang lebih dominan dan terdistribusi merata, sehingga campuran menjadi lebih padat dan memiliki ikatan antar partikel yang lebih baik.



Gambar 5. Hasil Uji EDS FABA 1%.

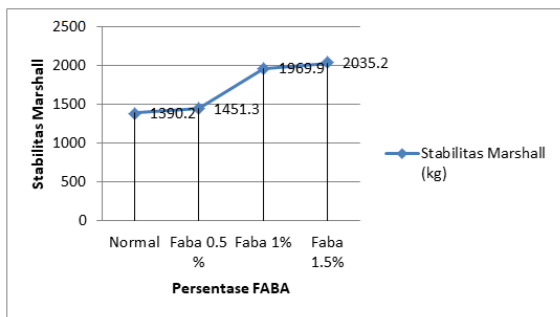
Pada 1,5% FABA, kandungan oksida mineral seperti SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , dan Fe_2O_3 semakin tinggi. Kondisi ini memperlihatkan bahwa FABA berfungsi efektif sebagai filler aktif karena mampu meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat melalui kontribusi unsur mineral. Namun demikian, tingginya kadar mineral juga berpotensi menyebabkan campuran menjadi lebih kaku dan kurang fleksibel terhadap deformasi.



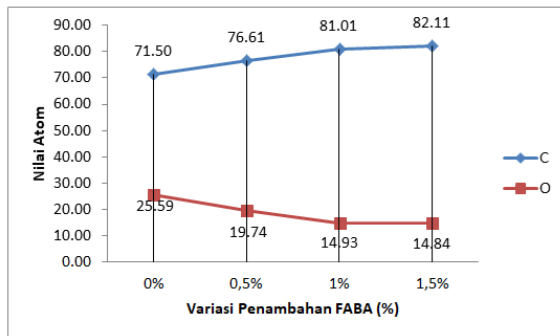
Gambar 6. Hasil Uji EDS FABA 1,5%.

Secara keseluruhan, hasil EDS mendukung dari uji *Marshall* dan SEM, dimana FABA berperan tidak hanya sebagai material pengisi fisik tetapi juga sebagai penguat kimia melalui kontribusi unsur oksida mineral. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan FABA sebesar 1% merupakan kondisi optimum karena mampu memberikan keseimbangan antara kandungan mineral, kepadatan mikrostruktur, serta kinerja mekanik campuran AC-WC. Grafik tren pengujian hasil *Marshall* dan SEM-EDS dapat dilihat pada Gambar 7.

Dari Gambar 7. Menunjukkan Penambahan FABA pada campuran AC-WC meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* dari 1390,2 kg pada kondisi normal menjadi 2035,2 kg pada FABA 1,5%. Hasil SEM-EDS menunjukkan peningkatan kandungan unsur C dan penurunan unsur O seiring bertambahnya FABA, yang mengindikasikan perubahan mikrostruktur material dan berkontribusi terhadap peningkatan kinerja mekanik campuran.



(a)



(b)

Gambar 7. Grafik Hasil Uji Marshall dan SEM-EDS

Tabel 3. Hubungan Hasil Uji Marshall, SEM, dan EDS pada Campuran AC-WC dengan Variasi FABA

Variasi FABA	Hasil Marshall	Hasil SEM	Hasil EDS	Keterangan Umum
0% (Normal)	Stabilitas 1390,2 kg, Flow 3,18 mm, MQ 4,92%, VMA 16,572%, VFB 70,311%, Memenuhi	Struktur permukaan masih relatif kasar dengan pori-pori terlihat jelas	Unsur dominan C dan O dari aspal, sedikit mineral alami (Si, Al rendah)	Campuran memenuhi spesifikasi, namun ikatan filler kurang rapat.
0,5% FABA	Stabilitas 1451,3 kg, Flow 3,22 mm, MQ 451,18 kg/mm, VIM 4,64%, VMA 16,326%, VFB 71,580%, Memenuhi	Permukaan mulai lebih rapat, pori mengecil, butiran filler FABA mulai terlihat menyatu dengan aspal	Peningkatan kandungan Si, Al, Ca, dari FABA	Ikatan lebih baik, peningkatan stabilitas awal terlihat.
1% FABA	Stabilitas 1969,9 kg, Flow 3,57 mm, MQ 552,31 kg/mm, VIM 4,10%, VMA 15,852%, VFB 74,138%, Memenuhi	Permukaan lebih padat, rongga lebih kecil, distribusi filler FABA homogen	Unsur Si, Al, Fe, Ca semakin dominan menunjukkan peran filler aktif	Kondisi optimum, Stabilitas dan kepadatan maksimum

1,5 % FABA	Stabilitas 2035,2 kg, Flow 3,05 mm, MQ 667,28 kg/mm, VIM 3,95%, VMA 15,719%, VFB 74,886%, Memenuhi	Permukaan sangat rapat, pori hampir tertutup, cenderung kaku	Unsur oksigen mineral tinggi, Menunjukkan filler FABA dominan	Stabilitas tertinggi, namun campuran cenderung lebih kaku dan beresiko retak bila beban berlebih.
-------------------	---	--	---	---

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil analisis karakteristik morfologi permukaan FABA menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan bahwa FABA memiliki struktur partikel halus, berpori, dan mengandung unsur mineral seperti silika (Si), alumina (Al), kalsium (K), dan magnesium (Mg) yang berperan sebagai *filler* aktif dalam campuran aspal AC-WC. Karakteristik ini membuat FABA dapat mengisi rongga antar agregat sehingga meningkatkan kepadatan dan kualitas ikatan dalam campuran aspal.
- Penambahan FABA sebagai *filler* berpengaruh terhadap karakteristik Marshall. Variasi 0,5% hingga 1,0% terbukti meningkatkan stabilitas dari 1390,2 kg menjadi 2035,2 kg, *Marshall Quotient* 436,71 kg/mm menjadi 667,28 kg/mm, serta persentase VFB 70,311% menjadi 74,886% tanpa mengurangi fleksibilitas, sehingga dianggap sebagai komposisi optimum. Namun, pada kadar 1,5%, campuran cenderung terlalu kaku dengan penurunan nilai *flow* dari 3,57 mm menjadi 3,05 mm, sehingga berpotensi menimbulkan retak dini meskipun stabilitas meningkat.

Saran untuk penelitian ini adalah melakukan variasi kadar FABA yang lebih luas, analisis durabilitas jangka panjang, serta pengujian di lapangan untuk memastikan kinerja campuran.

DAFTAR PUSTAKA

- N. K. Nur *et al.*, *Perancangan Perkerasan Jalan*. 2021.
- S. Sukirman, *Beton Aspal Campuran Panas*. 2016.
- D. N. Rachman, S. Riwayati, D. R. Sirait, and M. Arfan, "Penambahan Fly Ash Batu Bara Pltu Sebagai Filler Aspal Ac Wc," *Bear. J. Penelit. dan Kaji. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 4, p. 207, 2022.
- LPPT UGM, "Booklet Alat," pp. 1–19, 2022.
- S. E. Microscopy, "Modul Penggunaan dan Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Jakarta," 2022.

- [6] D. J. B. Marga, “Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2),” *Minist. Public Work. Hous.*, no. Oktober, p. 1036, 2018.
- [7] R. Ardi, R. M. Rustamaji, and E. Priadi, “Sifat-Sifat Fisis Campuran Fly Ash Dan Bottom Ash (Faba) Dengan Tanah Timbunan,” *J. Tek.*, vol. 21, no. 1, pp. 2–5, 2021.
- [8] M. Alvin, J. Jusmidah, and A. Fathussalam, “Pemanfaatan Fly Ash Amp PT. Piranti Jagad Raya Sebagai Filler Perkerasan AC-BC,” *J. Ilm. Ecosyst.*, vol. 24, no. 1, pp. 130–139, 2024.
- [9] W. K. Kapłonek and M. Ungureanu, “SEM-based imaging and analysis of surface morphology of the Trizact™ advanced structured abrasives,” *J. Mech. Energy Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 17–26, 2018.
- [10] A. Syahputra and T. E. Wulandari, “Pengaruh Fly Ash terhadap Kekuatan Ikatan Campuran Aspal,” *Blend Sains J. Tek.*, vol. 3, no. 4, pp. 432–441, 2025.