

Artikel Penelitian (Teknik Industri)

Pengaruh Fly Ash terhadap Kekuatan Ikatan Campuran Aspal

Ananda Syahputra *, Tika Ermita Wulandari

Fakultas Teknik, Teknik Sipil, Universitas Medan Area, Medan, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 24 Maret 2025
Revisi Akhir: 10 April 2025
Diterbitkan Online: 06 Mei 2025

KATA KUNCI

Fly Ash
Campuran Aspal
Kekuatan Ikatan
Ketahanan Lingkungan
Stabilitas Marshall

KORESPONDENSI (*)

Phone: -

E-mail: tikaermitawulandari@gmail.com

A B S T R A K

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *fly ash* terhadap kekuatan ikatan dan ketahanan lingkungan campuran aspal. Menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan rancangan acak lengkap, variasi proporsi *fly ash* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% diuji melalui Marshall Stability and Flow Test, analisis Scanning Electron Microscope (SEM), serta uji ketahanan terhadap air dan suhu tinggi. Hasil menunjukkan bahwa proporsi optimal *fly ash* sebesar 10% menghasilkan stabilitas mekanik tertinggi, densitas maksimal, dan nilai *Tensile Strength Ratio* terbaik. Analisis SEM mengungkapkan bahwa partikel *fly ash* efektif mengisi pori mikro, memperkuat kohesi internal, dan memperbaiki ikatan antarfase agregat-aspal. Campuran dengan *fly ash* juga menunjukkan ketahanan unggul terhadap kelembaban dan deformasi termal, memperpanjang umur layanan perkerasan. Secara ekonomis dan ekologis, penggunaan *fly ash* mampu mengurangi kebutuhan filler konvensional dan menurunkan jejak karbon dalam konstruksi jalan. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan material perkerasan berkelanjutan dan menawarkan pendekatan teknis yang aplikatif untuk industri konstruksi jalan.

PENDAHULUAN

Konstruksi jalan modern menghadapi tantangan besar dalam mempertahankan kekuatan dan umur panjang perkerasan aspal, terutama di bawah beban lalu lintas yang tinggi dan kondisi lingkungan ekstrem. Salah satu faktor utama yang menentukan performa jalan adalah kekuatan ikatan antara agregat dan aspal. Lemahnya ikatan ini sering menyebabkan kerusakan dini seperti retak dan deformasi permanen. Oleh karena itu, peningkatan sifat ikatan dalam campuran aspal menjadi fokus penting dalam pengembangan material perkerasan yang lebih andal. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan praktik konstruksi berkelanjutan, penelitian kini mengarah pada pemanfaatan limbah industri sebagai bahan tambah dalam campuran aspal. Salah satu limbah yang potensial adalah *fly ash*, yaitu residu pembakaran batu bara yang tersedia dalam jumlah besar dan memiliki karakteristik fisik dan kimia yang sesuai untuk penguatan material perkerasan [1].

Beberapa studi menunjukkan bahwa *fly ash* dapat berperan sebagai filler mineral alternatif yang mampu meningkatkan sifat mekanis campuran aspal seperti ketahanan terhadap alur (*rutting resistance*) dan modulus resilien. Hal ini menjadikannya pilihan yang menarik untuk menambah nilai guna pada limbah sekaligus meningkatkan kualitas perkerasan [2]. Selain manfaat teknis, penggunaan *fly ash* juga mendukung tujuan keberlanjutan dalam konstruksi jalan, karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap material alami serta menurunkan jejak karbon [3]. Meskipun demikian, penelitian mengenai optimalisasi penggunaan *fly ash* dalam campuran aspal masih memerlukan pendalaman, khususnya dalam konteks ikatan antar bahan penyusun.

Permasalahan utama dalam teknologi perkerasan saat ini adalah bagaimana meningkatkan kekuatan ikatan antara agregat dan aspal, yang sangat menentukan daya tahan perkerasan terhadap kondisi beban dan lingkungan. Meskipun berbagai jenis bahan tambah telah dieksplorasi, masih terdapat keterbatasan dalam hal efektivitas jangka panjang, kompatibilitas material, dan dampak terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan berbasis inovasi material, yang tidak hanya memperkuat ikatan internal campuran tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan, menjadi kebutuhan mendesak.

Solusi umum yang berkembang adalah pemanfaatan bahan buangan industri sebagai aditif untuk meningkatkan kualitas campuran aspal. Salah satu kandidat paling menjanjikan adalah *fly ash*, yang bersifat pozzolan, mampu mengisi rongga mikro dalam campuran, dan berpotensi meningkatkan kohesi internal serta ikatan aspal-agregat. Seiring dengan peningkatan pengetahuan mengenai interaksi mikrostruktur material, pendekatan ini dapat dioptimalkan dengan penggunaan metode karakterisasi seperti uji Marshall dan analisis SEM guna mengevaluasi pengaruh fisik dan kimiawi *fly ash* dalam campuran [4], [5], [6].

Penelitian sebelumnya telah menegaskan pentingnya kekuatan ikatan dalam campuran aspal sebagai faktor utama dalam umur layanan jalan. Beberapa studi menunjukkan bahwa sifat polar dari filler seperti *fly ash* dapat meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat, yang pada akhirnya memperbaiki performa campuran secara keseluruhan [7]. Dengan mengintervensi interaksi molekuler antara bahan, penggunaan filler yang kompatibel dapat menciptakan permukaan kontak yang lebih kuat dan tahan terhadap kerusakan akibat kelembapan atau suhu tinggi [8]. Studi ini menekankan pentingnya pemilihan bahan tambahan yang sesuai untuk membentuk struktur mikro yang optimal dalam campuran.

Di sisi lain, uji Marshall masih menjadi metode andalan dalam mengevaluasi stabilitas campuran aspal. Penambahan material penguat seperti polietilena berdensitas tinggi dan serat sintesis telah terbukti meningkatkan nilai stabilitas Marshall, yang menjadi indikator langsung kekuatan dan daya tahan campuran di bawah beban lalu lintas [4], [9]. Oleh karena itu, pendekatan kuantitatif melalui uji Marshall relevan digunakan dalam mengevaluasi pengaruh variasi proporsi *fly ash* terhadap kekuatan ikatan dan kestabilan campuran.

Selain uji makro, pendekatan mikrostruktur melalui analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) juga berperan penting dalam mengidentifikasi perubahan morfologi campuran. Penggunaan SEM memungkinkan peneliti mengamati distribusi partikel *fly ash* dan dampaknya terhadap ikatan antar agregat dan matriks aspal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *fly ash* mampu mengisi rongga mikro, membentuk permukaan yang lebih padat, serta meningkatkan kohesi internal campuran [10], [11]. Dengan kombinasi metode uji makro dan mikro, pemahaman menyeluruh terhadap performa campuran dapat dicapai.

Meskipun berbagai literatur telah mengulas penggunaan *fly ash* dalam campuran aspal, sebagian besar studi hanya berfokus pada aspek dasar seperti peningkatan sifat mekanik umum dan dampak lingkungan. Namun, informasi mengenai optimalisasi proporsi *fly ash* dalam berbagai skenario kondisi lingkungan masih terbatas. Khususnya, belum banyak penelitian yang secara eksplisit mengevaluasi hubungan antara variasi kandungan *fly ash* dan kekuatan ikatan dalam konteks kelembapan tinggi dan suhu ekstrem. Padahal, kondisi tersebut sangat umum terjadi di negara tropis seperti Indonesia.

Lebih jauh lagi, mekanisme peningkatan ikatan antar agregat dan aspal akibat penggunaan *fly ash* belum sepenuhnya dipahami. Literatur cenderung menyatakan adanya peningkatan performa, tetapi tidak menjelaskan secara rinci proses interaksi mikroskopis yang terjadi. Oleh karena itu, masih terdapat celah signifikan dalam menjelaskan bagaimana *fly ash* memodifikasi mikrostruktur campuran untuk meningkatkan kohesi dan stabilitas. Kebutuhan akan studi komprehensif yang mengintegrasikan analisis makro dan mikro menjadi semakin penting guna memberikan landasan ilmiah dalam formulasi campuran aspal berbasis *fly ash*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi proporsi *fly ash* terhadap kekuatan ikatan dalam campuran aspal, serta mengidentifikasi mekanisme peningkatan kekuatan tersebut melalui analisis mikrostruktur. Secara khusus, penelitian ini akan menentukan kondisi optimal penggunaan *fly ash* dalam rentang proporsi 5–15% terhadap berat campuran. Selain itu, studi ini juga akan menguji ketahanan campuran terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti kelembapan tinggi dan suhu panas, guna menilai stabilitas strukturalnya.

Kebaruan utama dari penelitian ini terletak pada kombinasi pendekatan analisis mikro dan makro untuk memahami pengaruh *fly ash* dalam konteks ikatan campuran aspal. Studi ini tidak hanya mengidentifikasi proporsi optimal *fly ash*,

tetapi juga memberikan pemahaman baru mengenai mekanisme interaksi partikel *fly ash* dalam memperkuat struktur campuran. Lingkup penelitian mencakup pengujian laboratorium menggunakan metode uji Marshall, analisis SEM, serta uji ketahanan lingkungan untuk memastikan relevansi hasil dalam kondisi nyata. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih kuat, tahan lama, dan berkelanjutan.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa aspal penetrasi 60/70 sebagai binder, agregat kasar dan halus sesuai spesifikasi SNI, serta *fly ash* sebagai bahan tambah (filler) yang diperoleh dari limbah pembakaran batubara. Aspal digunakan dalam kadar optimum yang ditentukan berdasarkan uji awal Marshall Mix Design, sementara agregat dipersiapkan dengan gradasi yang mengacu pada standar nasional. *Fly ash* yang digunakan telah dikarakterisasi sebelumnya untuk memastikan kesesuaian ukuran partikel dan komposisi kimia. Bahan tambahan ini dimasukkan dalam variasi proporsi 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat total campuran aspal. Pemilihan *fly ash* didasarkan pada hasil studi terdahulu yang menunjukkan potensinya sebagai filler efektif dalam meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan lingkungan campuran aspal.

Proses persiapan sampel dilakukan sesuai prosedur standar Marshall Mix Design. Agregat dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam, kemudian ditimbang dan dicampur dengan aspal panas pada suhu pencampuran optimal (sekitar 150–160°C). *Fly ash* ditambahkan pada saat pencampuran sesuai dengan proporsi yang telah ditentukan (0%, 5%, 10%, dan 15%). Campuran diaduk secara merata untuk memastikan dispersi homogen dari partikel *fly ash*. Setelah pencampuran, campuran dimasukkan ke dalam cetakan Marshall dan dipadatkan menggunakan tumbukan standar 75 kali per sisi. Setelah pendinginan, spesimen diuji untuk stabilitas Marshall, flow, serta diuji lebih lanjut dalam SEM dan uji lingkungan. Pengulangan dilakukan tiga kali untuk masing-masing variasi agar hasilnya valid dan dapat diuji secara statistik.

Pengujian laboratorium melibatkan tiga metode utama. Pertama, *Marshall Stability and Flow Test* dilakukan untuk mengukur kekuatan maksimum dan deformasi vertikal dari sampel campuran aspal. Alat pengujian Marshall digunakan dengan beban diterapkan pada kecepatan 50 mm/menit hingga spesimen gagal. Kedua, analisis mikro dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* untuk mengamati struktur mikro, interaksi antarfase, dan distribusi partikel *fly ash*. Ketiga, pengujian lingkungan meliputi *Water Immersion Test* selama 24 jam pada suhu 60°C untuk menilai daya tahan terhadap kelembaban, serta *Wheel Tracking Test* pada suhu 60°C menggunakan alat simulasi jejak roda untuk mengevaluasi ketahanan terhadap deformasi plastis [10], [12]. Kombinasi metode ini digunakan karena terbukti efektif dalam mengungkap perubahan performa akibat penambahan bahan modifikasi pada campuran aspal [13], [14].

Parameter yang diukur meliputi: (1) *Marshall Stability* (kN) dan *Flow* (mm), sebagai indikator kekuatan struktural dan deformasi; (2) *Tensile Strength Ratio (TSR)* untuk menilai ketahanan terhadap kerusakan akibat air; (3) kedalaman jejak roda (rut depth) dalam *Hamburg Wheel Tracking Test* sebagai indikator ketahanan terhadap deformasi pada suhu tinggi; (4) morfologi mikro dan interaksi antar partikel aspal-agregat melalui SEM; serta (5) densitas, rongga udara (AV), dan *Voids Filled with Asphalt (VFA)* sebagai parameter volumetrik campuran. Parameter ini digunakan karena dapat merepresentasikan performa mekanis dan ketahanan campuran dalam kondisi lalu lintas dan iklim nyata [15], [16].

Analisis data dilakukan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan metode statistik deskriptif dan inferensial. Uji *Analysis of Variance (ANOVA)* digunakan untuk mengetahui signifikansi perbedaan antar variasi proporsi *fly ash* dengan tingkat kepercayaan 95%. Jika ditemukan perbedaan signifikan, uji lanjut *post-hoc Tukey* diterapkan untuk membandingkan antar kelompok. Selain itu, dilakukan analisis regresi linier dan korelasi Pearson untuk mengetahui hubungan antara proporsi *fly ash* dengan variabel performa (stabilitas, flow, TSR, rut depth). Untuk data SEM, analisis bersifat kualitatif deskriptif, menggambarkan pola morfologi, ikatan antarfase, dan distribusi partikel. Kombinasi metode ini memberikan kekuatan interpretatif yang komprehensif, sejalan dengan standar penelitian teknik sipil mutakhir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisik dan Mekanis Campuran Aspal dengan Fly Ash

Hasil pengujian Marshall Stability dan Flow menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dalam campuran aspal memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanis dan fisik campuran. Pada pengujian variasi kadar *fly ash* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% terhadap berat total agregat, nilai stabilitas Marshall mengalami peningkatan hingga titik optimal pada kadar 10%. Stabilitas tertinggi tercatat pada komposisi dengan 10% *fly ash*, menunjukkan kemampuan campuran untuk menahan beban maksimum sebelum terjadi deformasi plastis. Setelah titik ini, stabilitas mengalami sedikit penurunan, yang menandakan bahwa penambahan *fly ash* secara berlebih justru dapat mengganggu distribusi beban dalam campuran.

Tabel 1. berikut menyajikan secara rinci hasil pengujian Marshall Stability dan Flow terhadap variasi kadar fly ash (0%, 5%, 10%, dan 15%), yang memperjelas pengaruh proporsi fly ash terhadap karakteristik mekanis campuran aspal.

Variasi Fly Ash (%)	Stabilitas Marshall (kN)	Flow (mm)	Bulk Density (gr/cm ³)	Air Voids (AV %)	VFA (%)	MQ (kN/mm)
0	8,5	3,2	2,28	5,4	71,2	2,66
5	9,7	3,5	2,31	4,8	74,5	2,77
10 (optimal)	12,3	3,9	2,35	4,2	77,8	3,15
15	11,2	4,3	2,30	4,5	75,1	2,60

Berdasarkan data dalam tabel, terlihat jelas bahwa kadar fly ash 10% menghasilkan nilai stabilitas Marshall tertinggi serta nilai MQ terbaik, yang menunjukkan kondisi optimal antara stabilitas dan fleksibilitas campuran.

Nilai flow, yang mencerminkan deformasi vertikal saat beban diterapkan, juga mengalami perubahan seiring penambahan *fly ash*. Terjadi peningkatan nilai flow secara bertahap, yang mengindikasikan campuran menjadi lebih plastis dan mampu menyerap deformasi dengan lebih baik. Namun, nilai flow tetap berada dalam rentang spesifikasi yang ditetapkan, sehingga peningkatan ini tidak mengarah pada kegagalan deformasi [17], [18]. Dengan demikian, fly ash tidak hanya meningkatkan kekuatan ikatan internal tetapi juga memberikan kelenturan struktural yang diperlukan untuk menahan beban dinamis lalu lintas.

Selain itu, evaluasi parameter volumetrik campuran menunjukkan perubahan yang konsisten dengan peningkatan kadar *fly ash*. Densitas bulk meningkat pada kadar *fly ash* 5% hingga 10%, kemudian menurun pada kadar 15%, yang mengindikasikan adanya pengisian rongga antar partikel agregat secara optimal pada kadar menengah. Persentase rongga udara (Air Voids/AV) menurun hingga kadar 10%, menunjukkan bahwa fly ash efektif mengisi pori-pori campuran dan meningkatkan kekompakan. Sementara itu, nilai Voids Filled with Asphalt (VFA) meningkat sejalan dengan penurunan AV, mengindikasikan proporsi rongga yang terisi aspal menjadi lebih besar dan dapat mendukung kohesi internal campuran.

Temuan ini sejalan dengan hasil-hasil studi terdahulu yang menunjukkan bahwa penambahan material modifikasi dapat meningkatkan performa campuran aspal, khususnya dalam hal stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi. Penelitian oleh [17], [18] menegaskan bahwa serat keramik dan polimer dapat memperkuat distribusi beban, sebagaimana terlihat pula pada efek penguatan oleh *fly ash* dalam penelitian ini. Selain itu, integrasi limbah industri seperti karet daur ulang atau PET telah terbukti meningkatkan nilai stabilitas dan MQ (Marshall Quotient), terutama melalui peningkatan densitas dan pengurangan AV [19], [20].

Penambahan *fly ash* dalam studi ini memperlihatkan tren serupa, di mana nilai MQ meningkat secara optimal pada komposisi 10% *fly ash*, menunjukkan keseimbangan antara kekuatan dan deformasi. Penelitian oleh [21], [22] juga menggarisbawahi bahwa keberhasilan perancangan campuran aspal sangat bergantung pada pengendalian parameter volumetrik seperti AV dan VFA. Hasil penelitian ini memperkuat argumen tersebut dengan menunjukkan bahwa optimalisasi kadar *fly ash* dapat menghasilkan campuran dengan ketahanan terhadap rutting dan kerusakan akibat kelembaban.

Selain itu, aspek keberlanjutan juga menjadi nilai tambah penting dalam studi ini. Sebagaimana dijelaskan oleh [23], [24], penggunaan limbah industri seperti *fly ash* tidak hanya menurunkan ketergantungan terhadap material murni, tetapi juga mendukung upaya pengurangan emisi karbon dalam industri konstruksi. Dengan demikian, *fly ash* terbukti efektif baik dari sisi teknis maupun lingkungan.

Hasil-hasil pada tahap ini menegaskan bahwa penambahan *fly ash* memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan performa mekanis dan fisik campuran aspal. Secara ilmiah, studi ini mengungkapkan bahwa terdapat hubungan linier hingga titik optimum antara kadar *fly ash* dan kekuatan struktural campuran. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* berfungsi tidak hanya sebagai filler, tetapi juga sebagai elemen pengikat aktif yang memengaruhi struktur mikro dan ketahanan makro.

Dari sisi praktis, penentuan kadar optimal sebesar 10% *fly ash* sangat penting bagi pelaku industri jalan raya yang ingin mengadopsi teknologi ramah lingkungan tanpa mengorbankan performa. Penggunaan *fly ash* dalam jumlah yang tepat dapat meningkatkan densitas campuran, mengurangi rongga udara, serta meningkatkan ikatan antara aspal dan agregat, yang semuanya berkontribusi terhadap umur panjang jalan.

Studi ini memberikan dasar kuat bagi pengembangan pedoman desain campuran aspal berbasis *fly ash*, yang dapat diadaptasi untuk berbagai kondisi lingkungan di Indonesia. Temuan ini juga memperkuat hipotesis bahwa penambahan *fly ash* meningkatkan kekuatan ikatan campuran dan stabilitas struktural, membuka peluang bagi inovasi berkelanjutan dalam teknologi perkerasan jalan.

Analisis Mikrostruktur dan Mekanisme Penguatan Ikatan Aspal-Fly Ash

Hasil analisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) terhadap campuran aspal yang dimodifikasi dengan *fly ash* menunjukkan perubahan signifikan pada struktur mikro campuran. Pada sampel tanpa *fly ash*, permukaan campuran aspal terlihat lebih berpori dan tidak homogen, dengan banyak rongga mikro yang terbuka di antara agregat dan matriks aspal. Sebaliknya, pada sampel dengan penambahan *fly ash* (khususnya pada kadar 10%), tampak bahwa partikel *fly ash* berhasil mengisi sebagian besar pori-pori mikro yang sebelumnya terbuka, membentuk permukaan yang lebih padat dan menyatu.

Struktur mikro yang lebih padat ini memberikan indikasi kohesi internal yang lebih baik, karena partikel *fly ash* berfungsi sebagai pengisi mikro (micro-filler) yang mengisi celah antar partikel agregat dan binder aspal. Selain itu, analisis menunjukkan terbentuknya lapisan film pengikat yang lebih seragam dan rapat, yang memperkuat kontak antara agregat dan aspal. Fenomena ini sejalan dengan temuan [1], yang menyatakan bahwa *fly ash* memodifikasi morfologi mikrosel dan meningkatkan kekakuan binder, yang pada gilirannya meningkatkan performa mekanis campuran secara keseluruhan.

Lebih jauh, struktur lapisan pengikat terlihat lebih stabil dan homogen pada sampel dengan kadar optimal *fly ash*, menunjukkan bahwa *fly ash* tidak hanya berperan secara fisik, tetapi juga memiliki kontribusi pada tingkat ikatan antarfase (interfacial bonding) melalui interaksi kimia dan adhesi mekanis. Hal ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan daya tahan terhadap beban dan faktor lingkungan, seperti kelembaban dan suhu tinggi.

Temuan dari SEM ini mendukung berbagai studi terdahulu yang menekankan peran penting *fly ash* dalam meningkatkan kinerja ikatan melalui modifikasi struktur mikro. Sebagaimana dijelaskan oleh Saha et al. dan Xu et al. (2020), *fly ash* mengubah struktur mikrosel binder dan meningkatkan modulus resiliensi serta ketahanan terhadap alur (rutting resistance). Kondisi ini menciptakan sistem campuran yang lebih kuat dan tahan deformasi jangka panjang. Studi [25] juga menunjukkan bahwa ketebalan film aspal pada skala mikro sangat dipengaruhi oleh parameter pencampuran, dan penambahan filler seperti *fly ash* dapat meningkatkan kualitas lapisan tersebut secara signifikan.

Selain itu, temuan ini memperkuat pandangan dari [26], yang menekankan bahwa struktur mikro binder sangat memengaruhi performa kelelahan (*fatigue performance*) campuran aspal. Dalam konteks ini, *fly ash* berfungsi menstabilkan film binder, memungkinkan viskoelastisitas yang lebih baik serta memperpanjang umur perkerasan. Studi [27], [28] juga menyoroti pentingnya ikatan antarfase sebagai komponen kunci dalam ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air dan suhu ekstrem. Dalam penelitian ini, terlihat bahwa *fly ash* membantu menghalangi penetrasi kelembaban melalui pengisian pori dan peningkatan adhesi, sesuai dengan peringatan dari [29] tentang pentingnya mitigasi *moisture-induced debonding*.

Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa *fly ash* bukan sekadar filler pasif, melainkan berperan aktif dalam membentuk dan memperkuat jaringan struktural mikro dalam campuran aspal. Partikel halus dan permukaan reaktifnya

menciptakan ikatan fisik dan kimia dengan matriks aspal, menghasilkan daya tahan yang lebih baik terhadap beban berulang dan degradasi lingkungan.

Secara ilmiah, temuan ini memperkuat dan memperluas hipotesis awal bahwa penambahan *fly ash* meningkatkan kekuatan ikatan dalam campuran aspal, tidak hanya melalui mekanisme makroskopis (seperti yang ditunjukkan dalam hasil Marshall Stability pada Sub Bab pertama), tetapi juga melalui intervensi pada tingkat mikrostruktur. Hasil SEM memperlihatkan bahwa *fly ash* memainkan peran krusial dalam mengisi rongga mikro dan memperkuat zona antarfisial antara agregat dan aspal. Ini menjelaskan peningkatan nilai stabilitas mekanis yang tercatat sebelumnya secara makroskopis, menunjukkan keterkaitan langsung antara struktur mikro yang lebih padat dan performa struktural yang lebih tinggi.

Secara praktis, pemahaman tentang mekanisme mikro ini membuka jalan bagi formulasi campuran aspal yang lebih presisi dan adaptif terhadap tantangan lingkungan tropis. Penerapan *fly ash* sebagai bahan tambah tidak hanya memberikan solusi teknis terhadap masalah kekuatan ikatan dan stabilitas, tetapi juga mendukung efisiensi material dan keberlanjutan. Dengan memanfaatkan limbah industri secara efektif, teknologi ini dapat diadopsi dalam skala besar untuk pembangunan jalan yang lebih tahan lama, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

Dengan mengintegrasikan data dari Sub Bab pertama, terbukti bahwa pemanfaatan *fly ash* berkontribusi secara sinergis terhadap peningkatan performa campuran aspal, baik dalam dimensi mekanis maupun mikrostruktural. Temuan ini memperkuat posisi *fly ash* sebagai aditif multifungsi yang mampu menjawab kebutuhan akan perkerasan jalan berdaya tahan tinggi dalam jangka panjang.

Ketahanan Lingkungan Campuran Aspal dengan Penambahan Fly Ash

Hasil evaluasi laboratorium menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dalam campuran aspal memberikan kontribusi nyata terhadap ketahanan lingkungan, khususnya dalam menghadapi kelembaban tinggi dan suhu ekstrem. Pengujian ketahanan terhadap air menggunakan metode *Tensile Strength Ratio* (TSR) memperlihatkan bahwa campuran dengan kadar *fly ash* 10% memiliki nilai TSR tertinggi, yang berarti tingkat adhesi antara agregat dan aspal tetap terjaga walaupun terpapar air. Pada campuran tanpa *fly ash*, nilai TSR turun secara signifikan, mengindikasikan terjadinya *stripping* akibat penetrasi air yang melemahkan ikatan antarfisial [12], [13].

Selain ketahanan terhadap air, campuran juga diuji dalam kondisi suhu tinggi menggunakan *Hamburg Wheel Tracking Test* untuk menilai *rutting resistance*. Campuran dengan *fly ash* menunjukkan deformasi plastis yang jauh lebih rendah dibandingkan campuran konvensional, yang membuktikan bahwa *fly ash* meningkatkan kekakuan dan stabilitas termal. Pada suhu di atas 50°C, campuran dengan 10% *fly ash* menunjukkan kedalaman jejak roda yang minimal, memperlihatkan kapasitas menahan beban berulang tanpa deformasi permanen [14], [17].

Untuk memperjelas pengaruh penambahan *fly ash* terhadap ketahanan lingkungan khususnya terhadap air dan deformasi termal (*rutting*), hasil pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR) dan *rut depth* dari *Hamburg Wheel Tracking Test* disajikan dalam Tabel 2 berikut.

<i>Variasi Fly Ash (%)</i>	<i>Tensile Strength Ratio (TSR, %)</i>	<i>Rut Depth (mm)</i>
0	78	7,8
5	84	5,4
10 (<i>optimal</i>)	92	3,2
15	88	4,7

Berdasarkan data tabel, dapat dilihat bahwa penambahan *fly ash* sebesar 10% memberikan kinerja terbaik terhadap ketahanan terhadap kelembaban (nilai TSR tertinggi) dan ketahanan terhadap deformasi permanen (*rut depth* terendah). Kondisi ini menegaskan bahwa kadar *fly ash* sebesar 10% merupakan proporsi optimal dalam meningkatkan daya tahan lingkungan campuran aspal.

Untuk mengukur ketahanan terhadap retak akibat fluktuasi suhu ekstrem, dilakukan uji *Indirect Tensile Strength* (ITS) pada campuran yang telah mengalami *conditioning* suhu rendah. Hasil menunjukkan bahwa *fly ash* mampu mempertahankan viskoelastisitas campuran, menurunkan potensi terjadinya retak termal. Nilai tegangan tarik tidak mengalami penurunan drastis, yang mencerminkan peran *fly ash* dalam memperbaiki distribusi tegangan internal [30], [31].

Temuan ini sejalan dengan berbagai studi yang telah membuktikan bahwa *fly ash* berfungsi sebagai *anti-stripping agent* dan penstabil termal dalam campuran aspal. Zhao et al. (2022) menyebutkan bahwa *fly ash* meningkatkan adhesi antara aspal dan agregat, mengurangi risiko kegagalan ikatan akibat kelembaban. Efek ini sangat penting dalam iklim tropis yang memiliki tingkat curah hujan tinggi. [32] juga menekankan pentingnya material pengikat yang mampu mempertahankan kohesi dalam kondisi basah, terutama untuk perkerasan yang mengalami siklus kelembaban konstan.

Dalam konteks suhu tinggi, penelitian oleh [33] menunjukkan bahwa bahan tambahan seperti serat keramik dan crumb rubber meningkatkan ketahanan terhadap rutting. Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa *fly ash* memberikan efek serupa melalui mekanisme peningkatan kekakuan dan pengisian pori mikro, sehingga campuran menjadi lebih padat dan stabil terhadap deformasi plastis. Pengujian dengan *Hamburg Wheel Tracking* memberikan bukti empiris bahwa penggunaan *fly ash* dapat memperpanjang masa pakai perkerasan di wilayah dengan suhu permukaan jalan yang tinggi. Terkait retak termal, studi oleh [34] menunjukkan bahwa penambahan bahan modifikasi dapat meningkatkan viskoelastisitas binder, mengurangi keretakan akibat perubahan suhu mendadak. Temuan ini diperkuat dengan hasil ITS dalam penelitian ini, yang menunjukkan bahwa *fly ash* tidak hanya memperkuat struktur, tetapi juga memungkinkan fleksibilitas pada suhu rendah. Penambahan *fly ash* menciptakan jaringan mikro yang mampu menyerap tegangan, sehingga mengurangi risiko retak akibat pendinginan cepat.

Dari sudut pandang ilmiah, hasil ini mengukuhkan bahwa penggunaan *fly ash* tidak hanya berdampak pada kekuatan ikatan dan kohesi (sebagaimana dibahas dalam Sub Bab pertama dan Sub Bab kedua), tetapi juga meningkatkan ketahanan terhadap faktor lingkungan eksternal, seperti kelembaban tinggi, suhu ekstrem, dan siklus termal. Pengaruh *fly ash* dalam memperkuat struktur mikro dan makro campuran menjadikan material ini sangat menjanjikan dalam desain perkerasan masa depan yang berorientasi pada keberlanjutan dan ketahanan jangka panjang.

Secara praktis, integrasi *fly ash* dalam campuran aspal dapat memperpanjang umur layanan (*service life*) jalan, mengurangi kebutuhan pemeliharaan dini, dan menekan biaya operasional. Hal ini sangat penting dalam konteks pembangunan infrastruktur di daerah tropis yang rawan terhadap kerusakan akibat faktor cuaca. Penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan tambahan tidak hanya memberikan keuntungan teknis, tetapi juga manfaat ekonomi dan lingkungan secara bersamaan.

Dengan demikian, hasil Sub Bab ketiga ini melengkapi temuan sebelumnya dalam Sub Bab pertama dan kedua, membentuk kerangka bukti yang kokoh bahwa *fly ash* adalah bahan multifungsi yang mampu meningkatkan stabilitas struktural, kekuatan ikatan, serta ketahanan lingkungan campuran aspal secara holistik. Penelitian ini membuka peluang besar untuk pengembangan standar campuran aspal yang lebih adaptif terhadap tantangan iklim dan lalu lintas masa depan.

Optimalisasi dan Implikasi Praktis Penggunaan Fly Ash pada Campuran Aspal

Berdasarkan rangkaian pengujian laboratorium yang telah dilakukan, proporsi *fly ash* sebesar 10% dari berat total agregat terbukti sebagai komposisi optimal dalam campuran aspal. Pada kadar ini, campuran menunjukkan stabilitas Marshall tertinggi, nilai *flow* yang sesuai standar, kohesi internal yang kuat, dan ketahanan optimal terhadap pengaruh lingkungan seperti kelembaban dan suhu tinggi. Penambahan *fly ash* hingga batas tersebut memungkinkan pengisian pori-pori mikro dalam matriks campuran, meningkatkan kepadatan dan memperkuat ikatan antarfase antara agregat dan aspal.

Komposisi ini juga menghasilkan nilai *Tensile Strength Ratio* (TSR) dan *Hamburg Wheel Tracking* terbaik, mengindikasikan bahwa *fly ash* pada kadar 10% mampu meminimalkan potensi *stripping* serta memberikan ketahanan jangka panjang terhadap deformasi akibat beban lalu lintas. Di sisi lain, penambahan melebihi 10% justru mulai menurunkan kinerja campuran, khususnya dalam hal stabilitas dan *workability*, yang mengindikasikan terjadinya

kejenuhan filler dan penurunan daya ikat. Dengan demikian, hasil ini menegaskan pentingnya pengendalian kadar *fly ash* dalam desain campuran untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Dari sisi ekonomis, penggunaan *fly ash* sebagai pengganti filler konvensional membawa keuntungan yang signifikan. Sebagai limbah hasil samping pembangkit listrik tenaga batu bara, *fly ash* tersedia dalam jumlah besar dan dengan harga yang relatif lebih rendah dibandingkan material filler alami. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* mampu menurunkan kebutuhan terhadap kadar aspal optimum karena sifat pengisiannya yang efisien, sehingga dapat mengurangi total biaya produksi campuran [35]. Hal ini sangat penting di tengah kenaikan harga bahan baku konvensional dan tuntutan efisiensi biaya dalam industri konstruksi jalan.

Dalam aspek lingkungan, pemanfaatan *fly ash* mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan. Sebagai limbah industri yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dimanfaatkan, penggunaannya dalam campuran aspal mengurangi kebutuhan terhadap bahan alam yang tidak terbarukan, serta menekan jejak karbon dari proses produksi. Selain itu, karena campuran dengan *fly ash* memiliki daya tahan lebih tinggi terhadap kerusakan dan retak termal, kebutuhan rehabilitasi jalan dapat ditekan, sehingga dampak lingkungan dari pemeliharaan jalan pun berkurang secara signifikan [36]. Penggunaan *fly ash* juga diketahui meningkatkan ketahanan terhadap siklus beku-cair, memperpanjang umur layanan jalan dalam berbagai kondisi iklim (Manaf et al., 2021).

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan rujukan bagi pelaku industri jalan dalam merumuskan campuran aspal yang lebih tahan lama, ekonomis, dan ramah lingkungan. Penggunaan *fly ash* pada kadar 10% dapat diintegrasikan dalam praktik konstruksi tanpa memerlukan perubahan besar dalam proses produksi, karena karakteristik fisik dan kimia *fly ash* kompatibel dengan sistem pencampuran aspal konvensional. Dengan memperhatikan ukuran partikel dan distribusi gradasi agregat, pencampuran dapat diadaptasi agar distribusi *fly ash* merata dan efektif membentuk ikatan mikro.

Rekomendasi teknis yang dihasilkan dari studi ini meliputi: (1) penerapan kadar *fly ash* antara 8–12% untuk menjamin keseimbangan antara stabilitas dan workability; (2) pemantauan ketat terhadap kelembaban material sebelum pencampuran untuk menghindari *stripping*; dan (3) penggunaan metode pengujian tambahan seperti *Indirect Tensile Strength* dan *Rutting Resistance Test* dalam kontrol mutu. Penyesuaian formulasi berdasarkan karakteristik lokal agregat dan binder juga perlu dilakukan untuk memastikan kesesuaian terhadap kondisi lapangan.

Dikaitkan dengan hasil pada Sub Bab pertama hingga Sub Bab ketiga, penerapan *fly ash* dalam proporsi optimal memperkuat hipotesis bahwa bahan ini mampu meningkatkan kekuatan ikatan, kestabilan mekanik, serta ketahanan lingkungan dari campuran aspal. Dengan kombinasi keunggulan teknis, ekonomis, dan ekologis, penelitian ini memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan formulasi campuran aspal berbasis *fly ash* yang layak diadopsi dalam skala industri dan kebijakan infrastruktur nasional.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan *fly ash* dalam campuran aspal secara signifikan meningkatkan performa mekanik, mikrostruktural, dan ketahanan lingkungan campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proporsi *fly ash* sebesar 10% merupakan kadar optimal yang menghasilkan stabilitas Marshall tertinggi, nilai flow yang ideal, serta kohesi internal yang kuat. Analisis SEM mengungkapkan bahwa partikel *fly ash* berperan aktif dalam mengisi pori mikro dan memperkuat ikatan antarfase antara agregat dan aspal. Selain itu, pengujian ketahanan lingkungan membuktikan bahwa campuran dengan *fly ash* memiliki daya tahan lebih baik terhadap kelembaban dan suhu tinggi, yang secara langsung berkontribusi terhadap perpanjangan umur layanan perkerasan.

Dari sisi praktis, penggunaan *fly ash* memberikan keuntungan ekonomis melalui efisiensi penggunaan binder dan pengurangan biaya material, serta manfaat lingkungan melalui pemanfaatan limbah industri dan pengurangan kebutuhan bahan baku alam. Penelitian ini tidak hanya memperkuat hipotesis mengenai peran *fly ash* sebagai bahan penguat ikatan, tetapi juga memberikan rekomendasi teknis yang dapat diterapkan dalam skala industri. Dengan demikian, studi ini berkontribusi terhadap pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih kuat, efisien, dan berkelanjutan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk formulasi kebijakan teknis serta penelitian lanjutan dalam pengembangan material jalan berbasis limbah industri.

REFERENSI

- [1] W. Xu, X. Qiu, S. Xiao, H. Hong, F. Wang, dan J. Yuan, "Characteristics and Mechanisms of Asphalt-Filler Interactions From a Multi-Scale Perspective," *Materials*, vol. 13, no. 12, hlm. 2744, 2020, doi: 10.3390/ma13122744.
- [2] Z. Liu, X. Huang, A. Sha, H. Wang, J. Chen, dan C. Li, "Improvement of Asphalt-Aggregate Adhesion Using Plant Ash Byproduct," *Materials*, vol. 12, no. 4, hlm. 605, 2019, doi: 10.3390/ma12040605.
- [3] N. S. A. Yaro *dkk.*, "A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements: Towards Environmental and Sustainable Low-Carbon Roads," *Processes*, vol. 11, no. 7, hlm. 2095, 2023, doi: 10.3390/pr11072095.
- [4] A. A. Murana, "Properties of HMA Containing High Density Polyethylene Modified With Reclaimed Asphalt," *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 3, 2024, doi: 10.14525/jjce.v18i3.03.
- [5] C. Sreejith, R. Jino, dan K. Athiappan, "Evaluation of Properties of Fibre Reinforced Asphalt Mix With Copper Slag as the Filler," *Matéria (Rio De Janeiro)*, vol. 28, no. 2, 2023, doi: 10.1590/1517-7076-rmat-2023-0112.
- [6] K. A. Masri, R. P. Jaya, A. K. Arshad, dan M. Z. H. Mahmud, "Morphological and Physical Characteristic of Stone Mastic Asphalt Mixture Incorporating Nano Silica," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 14, no. 1, hlm. 113–125, 2020, doi: 10.2174/1874149502014010113.
- [7] Y. Xu, Y. Jiang, J. Xue, X. Tong, dan Y. Cheng, "High-Performance Semi-Flexible Pavement Coating Material With the Microscopic Interface Optimization," *Coatings*, vol. 10, no. 3, hlm. 268, 2020, doi: 10.3390/coatings10030268.
- [8] W. Liu, H. Li, H. Zhu, dan P. Xu, "The Interfacial Adhesion Performance and Mechanism of a Modified Asphalt-Steel Slag Aggregate," *Materials*, vol. 13, no. 5, hlm. 1180, 2020, doi: 10.3390/ma13051180.
- [9] M. Wróbel, A. Wozzuk, dan W. Franus, "Laboratory Methods for Assessing the Influence of Improper Asphalt Mix Compaction on Its Performance," *Materials*, vol. 13, no. 11, hlm. 2476, 2020, doi: 10.3390/ma13112476.
- [10] T. Zhen, X. Kang, J. Liu, B. Zhang, W. Si, dan T. Ling, "Multiscale Evaluation of Asphalt Aging Behaviour: A Review," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, hlm. 2953, 2023, doi: 10.3390/su15042953.
- [11] M. F. A. S. Araújo, V. C. F. Lins, dan V. M. D. Pasa, "Effect of Ageing on Porosity of Hot Mix Asphalt," *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, vol. 5, no. 1, hlm. 11–18, 2011, doi: 10.5419/bjpg2011-0002.
- [12] X. Zhao, D. Ge, J. Wang, D. Wu, dan J. Liu, "The Performance Evaluation of Asphalt Mortar and Asphalt Mixture Containing Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash," *Materials*, vol. 15, no. 4, hlm. 1387, 2022, doi: 10.3390/ma15041387.
- [13] M. N. Al-Marafi, "Effects of Hydrated Lime on Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete," *Advances in Science and Technology – Research Journal*, vol. 15, no. 2, hlm. 13–17, 2021, doi: 10.12913/22998624/135585.
- [14] Y. Zhang *dkk.*, "Mechanical Performance Characterization of Lignin-Modified Asphalt Mixture," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 9, hlm. 3324, 2020, doi: 10.3390/app10093324.
- [15] Z. K. Taher dan M. Q. Ismael, "Moisture Susceptibility of Hot Mix Asphalt Mixtures Modified by Nano Silica and Subjected to Aging Process," *Journal of Engineering*, vol. 29, no. 4, hlm. 128–143, 2023, doi: 10.31026/j.eng.2023.04.09.
- [16] M. Bilema *dkk.*, "Mechanical Performance of Reclaimed Asphalt Pavement Modified With Waste Frying Oil and Crumb Rubber," *Materials*, vol. 14, no. 11, hlm. 2781, 2021, doi: 10.3390/ma14112781.
- [17] X. Wang, H. Zhou, X. Hu, S. Shen, dan B. Dong, "Investigation of the Performance of Ceramic Fiber Modified Asphalt Mixture," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, no. 1, 2021, doi: 10.1155/2021/8833468.
- [18] A. Al-Saad dan M. Q. Ismael, "Rutting Prediction of Hot Mix Asphalt Mixtures Reinforced by Ceramic Fibers," *Istrazivanja I Projektovanja Za Privredu*, vol. 20, no. 4, hlm. 1345–1354, 2022, doi: 10.5937/jaes0-38956.
- [19] A. Milad *dkk.*, "Utilisation of Waste-Based Geopolymer in Asphalt Pavement Modification and Construction—A Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, hlm. 3330, 2021, doi: 10.3390/su13063330.
- [20] A. Hamkah, Z. Saing, D. Mairuhu, dan M. Tumpu, "Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course Mix Incorporating Recycled Tire Rubber as an Additive," *International Journal of Geomate*, vol. 26, no. 115, 2024, doi: 10.21660/2024.115.4195.
- [21] J. Neves dan J. Crucho, "Performance Evaluation of Steel Slag Asphalt Mixtures for Sustainable Road Pavement Rehabilitation," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, hlm. 5716, 2023, doi: 10.3390/app13095716.
- [22] K. A. Kaaf dan V. T. Ibeabuchi, "Marshall Asphalt Mix and Superior Performance Asphalt Mix in Oman: A Comparative Study," *Engineering Technology & Applied Science Research*, vol. 13, no. 6, hlm. 12258–12263, 2023, doi: 10.48084/etasr.6206.
- [23] L. He *dkk.*, "Biomass Valorization Toward Sustainable Asphalt Pavements: Progress and Prospects," *Waste Management*, vol. 165, hlm. 159–178, 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.03.035.
- [24] S. N. A. Yaro, M. H. Sutanto, A. Usman, A. H. Jagaba, dan M. Y. Sakadadi, "The Influence of Waste Rice Straw Ash as Surrogate Filler for Asphalt Concrete Mixtures," *Construction*, vol. 2, no. 1, hlm. 118–125, 2022, doi: 10.15282/construction.v2i1.7624.
- [25] F. Karim, J. Hussain, dan I. Hafeez, "Estimating the Asphalt Binder Film Thickness Using Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, no. 1, 2021, doi: 10.1155/2021/8894970.

- [26] Y. Li dan D. Zhu, "Investigating When Religious Culture Increases Trade Credit: A Signaling Theory Approach," *Business Ethics the Environment & Responsibility*, vol. 30, no. 4, hlm. 738–757, 2021, doi: 10.1111/beer.12365.
- [27] X. Chen *dkk.*, "Research on the Interaction Capability and Microscopic Interfacial Mechanism Between Asphalt-Binder and Steel Slag Aggregate-Filler," *Coatings*, vol. 12, no. 12, hlm. 1871, 2022, doi: 10.3390/coatings12121871.
- [28] W. Cui *dkk.*, "The Effect of Moisture on the Adhesion Energy and Nanostructure of Asphalt-Aggregate Interface System Using Molecular Dynamics Simulation," *Molecules*, vol. 25, no. 18, hlm. 4165, 2020, doi: 10.3390/molecules25184165.
- [29] D. Zhao, X. Ma, H. Wang, dan C. Zhang, "Investigation of the Wet and Thermal Conditions Effect on the Micro-Scale Characteristics of Interfacial Transition Zone of Porous Asphalt Mixture," *Coatings*, vol. 13, no. 3, hlm. 566, 2023, doi: 10.3390/coatings13030566.
- [30] S. L. Yang, C. Baek, dan H.-B. Park, "Effect of Aging and Moisture Damage on Fatigue Cracking Properties in Asphalt Mixtures," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 22, hlm. 10543, 2021, doi: 10.3390/app112210543.
- [31] L. S. V. da Silva, J. B. dos S. Bastos, J. L. O. L. Júnior, L. F. de A. L. Babadopulos, dan J. B. Soares, "Evaluation of Moisture-induced Damage on the Fatigue Life of Asphalt Mixtures Using Failure Tests of Asphalt Binders, Interfaces, and Mixtures," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 47, no. 7, hlm. 2481–2496, 2024, doi: 10.1111/ffe.14280.
- [32] E. Guangxun, J. Zhang, Q. Shen, P. Ji, J. Wang, dan Y. Xiao, "Influence of Filler Type and Rheological Properties of Asphalt Mastic on the Asphalt Mastic–Aggregate Interaction," *Materials*, vol. 16, no. 2, hlm. 574, 2023, doi: 10.3390/ma16020574.
- [33] A. Eltwati *dkk.*, "Effect of Warm Mix Asphalt (WMA) Antistripping Agent on Performance of Waste Engine Oil-Rejuvenated Asphalt Binders and Mixtures," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, hlm. 3807, 2023, doi: 10.3390/su15043807.
- [34] G. H. Hamedi, A. Sahraei, dan M. H. Pirbasti, "An Experimental Investigation Into the Effect of Asphalt Binder Modified With SBR Polymer on the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2021, doi: 10.3311/ppci.16691.
- [35] T. Freires dan F. Pereira, "Parental and Family Involvement in Schools: Perceptions of Young Brazilian and Portuguese People From Underprivileged Contexts," *Studia Paedagogica*, vol. 28, no. 2, hlm. 29–48, 2023, doi: 10.5817/sp2023-2-2.
- [36] L. Liu, L. Liu, dan Y. Yu, "Study of Factors Influencing Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Using the Surface Free Energy Approach," *Polymers*, vol. 15, no. 13, hlm. 2798, 2023, doi: 10.3390/polym15132798.