

# Pengaruh Fraksi SARA Terhadap Sifat Temperatur Rendah Pengikat Aspal

Nur Hidayat<sup>1</sup> dan Zamak Syari<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> CV. Dimenstudio Consultant, Pamekasan

E-mail: Dimenstudio.C@gmail.com

**ABSTRAK:** Efek dari fraksi kimia pada perilaku reologi suhu rendah dari pengikat aspal dieksplorasi dalam penelitian ini. Empat fraksi, yaitu saturate, aromatic, resin dan asphaltene (SARA), diperoleh dari sebelas bahan pengikat aspal dengan metode pemisahan kromatografi kolom baru. Selain itu, kurva master viskoelastik untuk pengikat dan subsetnya dikarakterisasi dengan dynamic shear rheometer (DSR) pada frekuensi tinggi (suhu rendah). Hasil penelitian menunjukkan bahwa modulus kompleks dan sudut fasa pengikat aspal berhubungan erat dengan perubahan fraksi SARA. Selain itu, sifat temperatur rendah dari pengikat aspal yang ditandai dengan modulus kekakuan mulur dan nilai-m diukur dengan menggunakan uji bending beam rheometer (BBR). Peningkatan kadar aspal dalam bahan pengikat aspal mengakibatkan penurunan modulus kekakuan rangkai aspal dan nilai m. Selanjutnya, temperatur transisi gelas (T<sub>g</sub>) resin, aspal dan pengikat aspal diukur dengan uji differential scanning calorimetry (DSC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai T<sub>g</sub> dari bahan pengikat aspal terutama ditentukan oleh fraksi jenuh dan aromatik. Namun, nilai T<sub>g</sub> dari pengikat aspal akan meningkat seiring dengan peningkatan kandungan aspal. Akhirnya, hubungan yang signifikan antara fraksi SARA dan parameter suhu rendah spesimen pengikat aspal ditemukan dan dilakukan dengan menggunakan analisis regresi linier, yang menunjukkan bahwa fraksi SARA akan memberikan efek yang signifikan pada sifat suhu rendah pengikat aspal.

**Kata Kunci:** suhu rendah; kalorimetri pemindaian diferensial; suhu transisi gelas; model reologi

## 1. PENDAHULUAN

Aspal pengikat adalah bahan teknik yang terutama digunakan sebagai pengikat untuk konstruksi jalan dan sistem kedap air pada atap. Bahan ini dicirikan oleh sifat reologi yang sangat bergantung pada suhu, yang dikendalikan oleh interaksi kimia dan fisika dari konstituenya (Tang et al., 2025; Yousif et al., 2024). Retak pada suhu rendah pada bahan pengikat aspal merupakan masalah umum di seluruh dunia dan merupakan salah satu bentuk utama kerusakan perkerasan aspal. Meningkatkan kinerja anti-retak aspal dan mengevaluasi sifat temperatur rendahnya merupakan penelitian utama yang diajukan saat ini (Ding & Geng, 2025; Eka Putra et al., 2023; Prasetyo Eka Putra, Sutarsih, et al., 2024; Rangan & Tumpu, 2022; Rios et al., 2024; Safhi et al., 2022).

Bahan pengikat aspal memiliki komposisi kimia yang kompleks (Massara et al., 2024; Sun et al., 2025). Sulit untuk memodelkan komposisi kimiawi yang pasti dari bahan pengikat dan hubungannya dengan sifat-sifat rekayasa karena struktur molekul yang beragam dan kompleks yang terdiri dari pengikat aspal. Cara yang lebih praktis untuk menentukan hubungan antara komposisi kimia pengikat aspal dan sifat rekayasa adalah dengan mengklasifikasikan susunan kimia pengikat berdasarkan sifat-sifat yang berbeda daripada menentukan struktur molekul yang tepat pada pengikat tertentu (García Mainieri & Al-Qadi, 2025). Polaritas molekul pengikat aspal telah terbukti membantu dalam menentukan hubungan antara komposisi kimiawi pengikat dan sifat reologi (Pereira et al., 2025). Fraksi polar pengikat aspal biasanya dibagi menjadi dua jenis, asphaltenes dan maltenes. Pemisahan secara kromatografi merupakan metode pemisahan yang paling efisien dan praktis untuk pengikat aspal (Arifin, Senin, et al., 2024; Boarie et al., 2024; Putra, Fauzan, et al., 2024). Bahan pengikat aspal dapat dipisahkan menjadi fraksi jenuh, aromatik, resin, dan asphaltenes (SARA). Asphaltenes memiliki polaritas tertinggi, diikuti oleh resin,

aromatik, dan saturates (Jasim & Joni, 2024; Karyawan et al., 2022).

Sementara itu, hubungan antara fraksi SARA pengikat aspal dengan sifat fisis dan sifat teknisnya telah diselidiki secara luas oleh banyak peneliti selama beberapa dekade terakhir. Corbett menemukan bahwa aspal dan resin membantu dalam meningkatkan kekakuan bahan pengikat aspal, sedangkan saturat dan aromatik berkontribusi pada sifat plastis dan lunak (Al-Mohammed & Al-Hadidy, 2024). Hasil yang diperoleh Dealy menunjukkan bahwa viskositas pengikat pasir minyak menurun dengan penambahan maltenes, sedangkan viskositas pengikat meningkat dengan penambahan aspal (Nazir et al., 2022). Robertson menemukan bahwa komposisi nonpolar berkontribusi pada sifat kental pengikat aspal sedangkan polar berkontribusi pada sifat elastis (Arifin, Senin, et al., 2024; Boarie et al., 2024). Selain itu, laporan yang diusulkan oleh Robertson dkk. menunjukkan bahwa sumber pengikat dan jumlah relatif maltenes dan asphaltenes memberikan pengaruh yang signifikan terhadap viskositas pengikat aspal (Albayati & Ismael, 2023). Sharmin dan Amit mengindikasikan bahwa kekuatan tarik dan kekakuan pengikat aspal dapat ditingkatkan dengan peningkatan konsentrasi fraksi polar (Shen & Wang, 2025). melakukan temuan yang menarik. Mereka menemukan bahwa perilaku pengikat aspal dikendalikan oleh beberapa faktor, seperti jumlah zat kimia, berat molekul, polaritas, struktur kimia, dan interaksi timbal baliknya. Selain itu, dalam beberapa kasus, pengikat dengan kadar aspal yang relatif lebih rendah menunjukkan sifat yang lebih getas dan kaku dibandingkan dengan pengikat dengan kadar aspal yang lebih tinggi (terutama pada kondisi suhu rendah) (S. Chen et al., 2023; Prasetyo et al., 2023; Putra, Fauzan, et al., 2024; Wang et al., 2023).

Selain itu, telah diterima dengan baik bahwa pengikat aspal adalah sistem koloid (Mabui et al., 2024; Saboo et al., 2024). Transisi aspal dipelajari secara luas untuk mengevaluasi sifat suhu rendah pengikat aspal. Differential scanning calorimetry (DSC) digunakan

untuk mempelajari komposisi fasa pengikat aspal (Albayati & Ismael, 2023; Hamkah et al., 2024; Nazir et al., 2022; Shen & Wang, 2025). Beberapa peneliti menemukan bahwa temperatur transisi gelas (Tg) pengikat aspal berhubungan erat dengan komposisi aspal. Nilai Tg pengikat aspal menurun seiring dengan meningkatnya kandungan atom karbon parafinik dan berkurangnya kandungan aspal (Sihombing et al., 2023; Vimalkumar & Latha, 2025; Vinod & Mahesha, 2025). Ditemukan bahwa temperatur transisi gelas fraksi jenuh adalah sekitar  $-70^{\circ}\text{C}$ , dan nilai Tg fraksi naftenat dan aromatik adalah sekitar  $-40^{\circ}\text{C}$  (Khalil et al., 2023; Saha & karmakar, 2024). Selain itu, hubungan antara Tg dan sifat reologi aspal, pengikat aspal telah ditetapkan. Viskositas absolut dari bahan pengikat aspal dapat dihitung dari temperatur transisi gelas masing-masing dengan menggunakan persamaan Williams-Landel-Ferry (Wang et al., 2023).

Selain itu, banyak metode pengujian yang dapat digunakan untuk mengevaluasi sifat temperatur rendah dari bahan pengikat aspal. Bending beam rheometer (BBR) digunakan untuk mendapatkan modulus kekakuan rangkai, nilai m dan kepatuhan rangkai bahan pengikat aspal pada suhu rendah. Sifat reologi suhu rendah dari bahan pengikat aspal dapat tercermin dengan baik sebagai hasil dari pengujian. Selain itu, DSR dengan geometri pelat paralel 4 mm diusulkan untuk menentukan sifat suhu rendah pengikat aspal. (Cao et al., 2023; Cui et al., 2023; Prasetyo Eka Putra, Moh Riski, et al., 2024; Yang et al., 2023). Korelasi empiris antara kekakuan rangkai yang ditentukan dengan BBR dan modulus kompleks yang diukur dengan DSR telah dibuat dan diterapkan untuk memperkirakan tingkat kinerja rendah (PG) pengikat aspal (Ding & Geng, 2025; Putra, Mahmud, et al., 2024; Yousif et al., 2024).

Secara khusus, bahan pengikat aspal kelas keras telah mendapat perhatian lebih karena kekakuannya yang cukup untuk menahan deformasi permanen pada suhu tinggi. Sementara itu, kekakuan pengikat aspal kelas lunak tidak mencukupi pada kondisi suhu tinggi. Bahan pengikat aspal kelas keras lebih disukai pada iklim panas sedangkan kelas lunak lebih disukai pada iklim dingin. Oleh karena itu, perlu dilakukan pencampuran kedua jenis bahan pengikat aspal tersebut untuk menghasilkan aspal perkerasan jalan yang berkualitas tinggi dan memiliki nilai tambah yang tinggi. Saat ini, aplikasi pencampuran bahan pengikat aspal kelas lunak dengan bahan pengikat aspal kelas keras menunjukkan prospek komersial yang baik dan nilai aplikasi industri. Namun, ada pekerjaan terbatas yang dilakukan untuk menyelidiki dampak fraksi kimia pada sifat suhu rendah pengikat aspal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi pengaruh fraksi SARA terhadap perilaku reologi suhu rendah dari pengikat aspal. Fraksi SARA dari pengikat aspal diperoleh dengan menggunakan metode pemisahan yang dimodifikasi. Selanjutnya, kurva master viskoelastik untuk modulus geser kompleks dan sudut fasa jenuh, aromatik, resin, dan pengikat aspal dibuat untuk mengungkap hubungan antara fraksi SARA

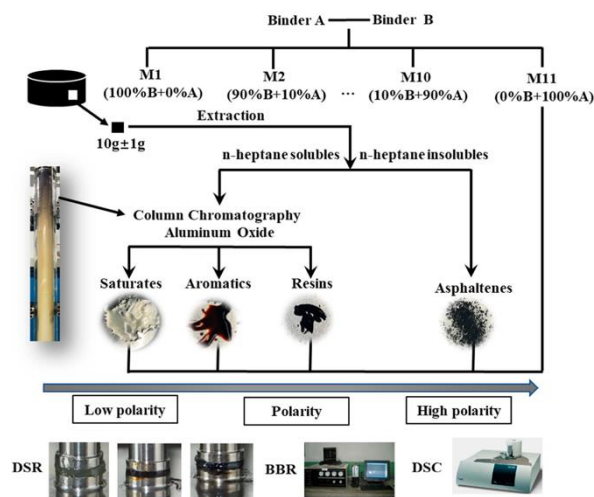
dan pengikat aspal pada frekuensi tinggi (suhu rendah). Selain itu, sifat temperatur rendah dari fraksi SARA dan pengikat aspal diukur dengan BBR dan DSC. Terakhir, analisis regresi linier digunakan untuk mengaitkan fraksi-fraksi SARA dengan sifat temperatur rendah pengikat aspal. Melalui investigasi awal mengenai hubungan antara fraksi SARA dan sifat reologi suhu rendah pengikat aspal, akan lebih baik untuk mempromosikan aplikasi aspal kelas keras dalam teknik perkerasan dan atap serta penelitian modifikasi dan regenerasi pada bahan aspal

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, pemisahan bahan pengikat aspal menjadi fraksi-fraksi SARA sesuai dengan standar ASTM D4124-09, namun dilakukan sedikit penyesuaian untuk mendapatkan pemisahan bahan pengikat aspal yang lebih banyak. Pertama-tama, sekitar 10 g ( $\pm 1$  g) pengikat aspal dimasukkan ke dalam botol kerucut 500 ml, kemudian n-heptana ditambahkan sesuai dengan rasio 30 ml per gram pengikat aspal. Botol kerucut dimasukkan ke dalam Kotak getaran ultrasonik dan digetarkan selama 30 menit pada suhu  $60^{\circ}\text{C}$ . N-heptana disaring dengan kertas saring kuantitatif untuk disimpan dalam botol kerucut yang lain. Kemudian kertas saring kuantitatif dimasukkan ke dalam ekstraktor dan mengalami ekstraksi toluena untuk memulihkan aspal. Sementara itu

Tabel 1. Sifat-sifat pengikat dasar.

| Sifat fisik                                           | Metode pengujian | Pengikat A (#30) | Pengikat B (#70) |
|-------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Penetrasi ( $25^{\circ}\text{C}$ ) / $\text{dmm}$     | ASDM D5          | 24.6             | 71.2             |
| Titik pelunakan / $^{\circ}\text{C}$                  | ASTM D36         | 82.0             | 46.3             |
| Viskositas ( $135^{\circ}\text{C}$ ) / $\text{Pa.s}$  | ASTM D4402       | 0.880            | 0.375            |
| Ductility ( $10^{\circ}\text{C}$ , 5 cm / menit) / cm | ASTM D113        | 7                | 33               |



Gambar 1. Diagram alir desain eksperimen pengikat aspal.

Fasa cair dalam botol kerucut dipekatkan hingga volume 50 ml ( $\pm 5$  ml). Langkah kedua adalah menyaring maltenes melalui kolom kromatografi yang berisi alumina. Kejenuhan Fraksi saturasi pertama kali dipisahkan dengan n-heptana. Kemudian, toluena murni digunakan, diikuti dengan pemisahan fraksi aromatik dengan campuran toluena dan etanol dengan perbandingan 1:1. Terakhir, resin dipisahkan dengan toluena dan etanol. Pelarut dihilangkan dengan penguapan berdasarkan standar ASTM D4124-09 dan fase padat yang terpisah kemudian

digunakan untuk analisis lebih lanjut. Metode pemisahan fraksi SARA dari pengikat aspal ditunjukkan pada Gambar 1

Uji sapuan dynamic shear rheometer (DSR) adalah metode yang sangat berguna untuk mengevaluasi sifat viskoelastik dari pengikat aspal. Modulus geser dinamis dari bahan pengikat aspal diukur untuk menentukan sifat viskoelastiknya. Bahan pengikat aspal dan komposisi fraksionalnya dilakukan dengan uji sapuan DSR untuk menentukan sifat viskoelastik. Bahan pengikat aspal diuji pada dua rentang temperatur yang berbeda (0-40°C dan 50-80°C). Pelat 8 mm dengan ketebalan spesifik 1 mm digunakan untuk suhu 0-40°C dengan interval 10°C, dan pelat 25 mm dengan celah 1 mm digunakan untuk suhu 50-80°C.

1 mm digunakan untuk 50-80 ° C pada interval 10 ° C. Pengujian jenuh dan aromatik dilakukan di- pada suhu 10, 0, 10, 20, 30, 40, dan 50°C dengan frekuensi pembebanan 0,1-20 Hz. Pengujian dilakukan menggunakan pelat 8 mm dengan celah 1 mm. Sementara itu, pengujian Resin dilakukan untuk rentang suhu tinggi (60-110°C dengan interval 10°C), dan menggunakan pelat 8 mm dengan celah 1 mm. Sebagai tambahan, rentang frekuensi pembebanan 0,1-20 Hz dilakukan untuk setiap suhu pengujian. Untuk setiap benda uji, mode regangan terkontrol dengan regangan 0,01% dipilih untuk memastikan bahwa pengujian tetap berada di wilayah viskoelastik linier. Perlu dicatat bahwa aspal adalah fase padat dan tidak dapat diuji. Pada setiap suhu pengujian, sampel didiamkan selama 10 menit untuk mencapai keseimbangan termal. Prinsip superposisi waktu-suhu (TTSP) dipilih untuk membuat kurva master untuk modulus kompleks  $G^*$  dan sudut fasa  $\delta$  pada suhu referensi 25°C.

Temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) ditentukan dengan differential scanning calorimeter (DSC) 204 F1 Phoenix. Temperatur transisi gelas dari pengikat aspal, resin, dan aspal-tene diuji. Semua sampel diukur di bawah atmosfer nitrogen. Berat sampel uji dikontrol dengan kisaran 3-5 mg. Sampel dipindahkan ke dalam cawan lebur aluminium berukuran 40 liter mikro, yang disegel dan ditimbang. Pemindaian pemanasan direkam dari - 40°C hingga 20°C dengan laju pemanasan 10°C/menit

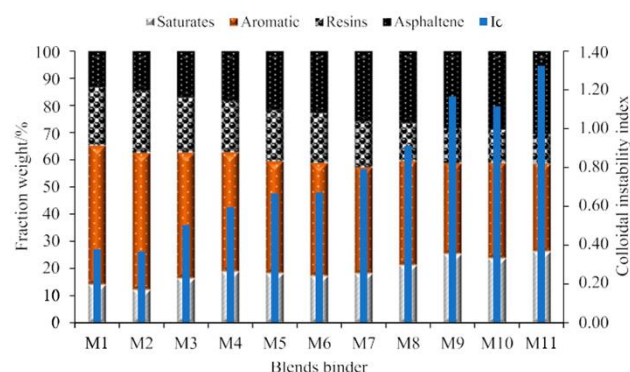
Ketahanan retak dari bahan pengikat aspal murni pada suhu rendah (- 6°C,- 12°C,- 18°C dan- 24°C) ditentukan dengan menggunakan uji Cannon BBR dalam dua kali ulangan sesuai dengan ASTM D6648. Perilaku reologi pengikat aspal ditentukan dengan menggunakan kekakuan (S) dan laju rangkakan (nilai-m) dari balok sampel. Nilai-m adalah kemiringan kurva kekakuan rangkakan (S(t)) dan durasi pembebanan, yang diplot dalam skala logaritmik-logaritmik. Spesifikasi Superpave menetapkan batas kriteria untuk nilai kekakuan rangkakan dan nilai m pada 60 detik pembebanan rangkakan BBR, yang masing-masing ditetapkan sebagai S(60) dan m(60).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN.

Untuk memahami sepenuhnya pengaruh proporsi pencampuran bahan pengikat A dengan bahan pengikat B terhadap komposisi fisika dan kimia, fraksi-fraksi SARA dari campuran tersebut diilustrasikan seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 2. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2, saturat dengan suhu transisi gelas yang cukup rendah, yaitu sekitar- 70°C, merupakan cairan berwarna terang atau tidak berwarna pada suhu kamar (K. Chen et al., 2025; Tangga et al., 2024). Saturat terdiri dari beberapa struktur bercabang yang berbeda,

rantai alifatik panjang dan rantai lurus kristal n-alkana. Selain itu, sedikit sekali parafin yang berasal dari hidrokarbon naftenat (Arifin, Wicaksono, et al., 2024). Aromatik menempati proporsi mayoritas fraksi dalam pengikat aspal, menunjukkan cairan berwarna coklat di bawah kondisi suhu kamar (lihat Gambar 1). Dibandingkan dengan saturat, fraksi aromatik terdiri dari cincin aromatik yang terkondensasi dengan viskositas yang meningkat pada kondisi suhu yang sama. Resin berwarna hitam pekat dalam kondisi suhu kamar. Resin biasanya terdiri dari cincin aromatik yang terkondensasi



Gambar 2. Fraksi SARA dari berbagai bahan pengikat aspal.

(Massara et al., 2024). Koots melakukan penelitian bahwa struktur resin hampir sama dengan aspal kecuali struktur aromatik yang tidak terlalu kompleks dan massa molar yang lebih rendah (Kaya & Çodur, 2025)). Sementara itu, resin, sebagai penstabil aspal, sangat penting dalam stabilitas pengikat aspal. Aspalten adalah bubuk hitam di bawah kondisi suhu kamar, yang terutama mencerminkan warna hitam pengikat aspal. Meskipun struktur aspalten sulit untuk diuraikan secara rinci, sebuah penelitian baru-baru ini menunjukkan bahwa molekul aspalten mengandung kisaran angka karbon yang sama dengan molekul maltena. Selain itu, asphaltenes lebih aromatik daripada maltene, dengan mengandung lebih banyak logam dan heteroatom (García Mainieri & Al-Qadi, 2025; Konieczna et al., 2025). Hasil analisis kandungan SARA pada sampel pencampuran menunjukkan keteraturan yang jelas pada Gambar 2. Kandungan saturates dan asphaltenes menunjukkan tren yang meningkat dari M1 ke M11, sedangkan kandungan aromatik dan resin menunjukkan penurunan yang terlihat pada Gambar 3. Bahan pengikat M11 menghasilkan penetrasi yang lebih rendah dan titik lembek yang lebih tinggi yang memiliki kandungan aspal tertinggi. Oleh karena itu, modulus kekakuan yang sangat baik dapat diprediksi pada pengikat M11 untuk menahan rutting pada perkerasan jalan pada kondisi temperatur tinggi. Namun, aspal ini rentan terhadap keretakan pada kondisi suhu rendah, yang dapat disimpulkan dari suhu rendah kritis pada pengujian BBR dan tidak cocok untuk digunakan



pada perkerasan jalan raya. Di sisi lain, aromatik merupakan komponen ideal untuk pengikat aspal perkerasan jalan raya, dan M1 memiliki kandungan aromatik tertinggi. Dalam penelitian ini, campuran pengikat (M1-M11) terdiri dari proporsi aspal keras dan aspal lunak yang berbeda. Fraksi SARA dari campuran tersebut menunjukkan karakteristik yang berbeda, kompromi antara M1 dan M11. Oleh karena itu, dapat dilakukan pembuatan aspal pengikat dengan kinerja tinggi dengan mencampurkan aspal pengikat B dengan pengikat A.

#### 4. KESIMPULAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki hubungan antara fraksi SARA dan perilaku reologi temperatur rendah dari bahan pengikat aspal. Fraksi SARA yang dipisahkan dari 11 campuran dari 2 bahan pengikat awal diperoleh untuk mempelajari pengaruhnya terhadap sifat temperatur rendah dengan uji DSR, BBR, dan DSC. Kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut.

- (1) Metode pemisahan kromatografi kolom baru diterapkan untuk memungkinkan analisis pengikat yang lebih berbeda.
- (2) Fraksi SARA dari sebelas bahan pengikat aspal berubah dengan jelas, dan nilai Ic dari M1 ke M11 meningkat secara bergantian. Sementara itu, sifat fisik dan kimia dari fraksi SARA jelas berbeda, sehingga mempengaruhi perilaku reologi pengikat aspal.
- (3) Perangkat DSR dapat digunakan untuk mengkarakterisasi sifat reologi Saturates, Aromatics, dan Resin dari pengikat pada berbagai suhu yang tepat. Kurva master viskoelastik dari pengikat, Saturates, Aromatics dan Resin sangat berbeda.
- (4) Modulus pengikat aspal berkaitan erat dengan perubahan fraksi SARA. Modulus kompleks pengikat aspal menurun dengan meningkatnya nilai Ic pada temperatur rendah (frekuensi tinggi).
- (5) Peningkatan aspal dalam pengikat aspal mengakibatkan penurunan modulus kekakuan rangkai aspal dan juga nilai m. Kinerja temperatur rendah dari bahan pengikat A dapat ditingkatkan dengan mencampurnya dengan lebih dari 50% bahan pengikat B. Oleh karena itu, penggunaan bahan pengikat aspal kelas keras dapat diperluas dengan mencampurnya dengan aspal kelas lunak.
- (6) Temperatur transisi gelas pengikat aspal terutama ditentukan oleh fraksi jenuh dan aromatik, tetapi akan meningkat dengan meningkatnya kandungan aspal.
- (7) Terdapat korelasi yang baik antara temperatur transisi gelas dan temperatur rendah kritis, yang secara efektif dapat mengkarakterisasi perilaku temperatur rendah pengikat aspal.

#### 5. Daftar Pustaka

- Albayati, N., & Ismael, M. Q. (2023). Effect of carbon fibers (length, dosage) on the Marshall and volumetric properties of HMA mixtures. *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias*, 11(3), 71–80. <https://doi.org/10.15649/2346030X.3243>
- Al-Mohammed, M. A., & Al-Hadidy, A. I. (2024). Comparative Performance of Unmodified and SBS-Modified Asphalt Mixtures Made with Blowdown (CarSul) and Calcium Carbonate as Mineral Fillers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(6). <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-17369>
- Arifin, M. Z., Senin, I. F., Bowoputro, H., Kore, D. M. H., Ingsih, I. S., & Putri, F. F. B. (2024). the Effect of Polyethylene Terephthalate (Pet) Plastic Addition To Ac-Wc in a Wet Mixture on Increase of Asphalt Stability. *EUREKA, Physics and Engineering*, 2024(2), 21–33. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003328>
- Arifin, M. Z., Wicaksono, A., Bowoputro, H., Ghufro, R. R., & Abdurrahman, M. Y. (2024). Identifying the effect of adding coconut coir on the characteristics of the top layer of pure natural buton asphalt concrete wearing course (AC-WC). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6 (130)), 59–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309733>
- Boarie, A., Abdelsalam, M., Gamal, A., & Rabah, M. (2024). Laboratory and Environmental Assessment of Asphalt Mixture Modified with a Compound of Reclaimed Asphalt Pavement and Waste Polyethylene. *Buildings*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/buildings14051186>
- Cao, D., Xu, Y., Yang, Z., Dong, H., & Li, X. (2023). An enhanced whale optimization algorithm with improved dynamic opposite learning and adaptive inertia weight strategy. *Complex and Intelligent Systems*, 9(1), 767–795. <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00827-1>
- Chen, K., Torbaghan, M. E., Thom, N., & Faramarzi, A. (2025). Physics-guided neural network for predicting international roughness index on flexible pavements considering accuracy, uncertainty and stability. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109922>
- Chen, S., Sun, Y., Han, H., Shi, G., Guan, Y., & Guerrero, J. M. (2023). Dynamic Frequency Performance Analysis and Improvement for Parallel VSG Systems Considering Virtual Inertia and Damping Coefficient. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 11(1), 478–489. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3208249>
- Cui, W., Jiang, Y., & Zhang, B. (2023). Reinforcement Learning for Optimal Primary Frequency Control: A Lyapunov Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(2), 1676–1688. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3176525>
- Ding, H., & Geng, X. (2025). Strength and Durability Performance of Sandy Loam Reinforced with Xanthan Gum and Biochar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(2). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18508>
- Eka Putra, F. P., Arifin, Moh. N., Zulfana Imam, K., Saputra, E., & Sofiyullah. (2023). Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum. *Jurnal Informasi Dan Teknologi*, 109–119. <https://doi.org/10.37034/jidt.v5i2.367>
- García Mainieri, J. J., & Al-Qadi, I. L. (2025). Designing Stone-Matrix Asphalt to Optimize Sustainability Using Limestone, Dolomite, and Crushed Gravel Aggregates. *Journal of Transportation Engineering Part B:*

- Pavements*, 151(1).  
<https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1614>
- Hamkah, Saing, Z., Mairuhu, D., & Tumpu, M. (2024). Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course Mix Incorporating Recycled Tire Rubber As an Additive. *International Journal of GEOMATE*, 26(115), 34–43. <https://doi.org/10.21660/2024.115.4195>
- Jasim, E. N., & Joni, H. H. (2024). Assessment of potential resistance to moisture damage and fatigue cracks of asphalt mixture modified with ground granulated blast furnace slag. *Open Engineering*, 14(1). <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0551>
- Karyawan, I. D. M. A., Yuniarti, R., Widianty, D., Hasyim, & Wahyudi, M. (2022). Impact Curing Time and Compaction Methods to the Performance of Hot Mix Asphalt Asbuton. *Civil Engineering and Architecture*, 10(5), 2054–2064. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100526>
- Kaya, Ö., & Çodur, M. Y. (2025). Automatic detection and classification of road defects on a global-scale: Embedded system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116453>
- Khalil, A. E., Boghdady, T. A., Alham, M. H., & Ibrahim, D. K. (2023). Enhancing the Conventional Controllers for Load Frequency Control of Isolated Microgrids Using Proposed Multi-Objective Formulation via Artificial Rabbits Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 11, 3472–3493. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234043>
- Konieczna, K., Król, J. B., Farid, M., Gajewski, M. D., Pokorski, P., Baldo, N., & Valentin, J. (2025). Discussion on the bitumen fatigue parameters interpretation for Linear Amplitude Sweep and time-sweep tests: Insights from ageing. *Construction and Building Materials*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139941>
- Mabui, D., Tumpu, M., Widodo, S., Rusmin, M., Rangan, P. R., & Mansyur. (2024). Optimization of Asphalt Content Through Marshall Characteristics Using Modified Asbuton. *International Journal of GEOMATE*, 26(117), 116–123. <https://doi.org/10.21660/2024.117.4133>
- Massara, A., Bulgis, & Setiawan, A. R. (2024). The Marshall Characteristics of Mixed Asphalt Concrete-Wearing Course Using Kudo Gum Additive. *Civil Engineering and Architecture*, 12(1), 109–120. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120109>
- Nazir, A., Liao, M. C., Zhu, Y. W., & Nazir, U. (2022). Design and Evaluation of Asphalt Concrete Incorporating Plastic Aggregates Fabricated Using 3D Printing Technology. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(3), 212–222. <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0347>
- Pereira, P. G. dos S., Coutinho, R. Q., de Souza Neto, D. P., & Gomes, I. F. (2025). Stability Analysis of an Urban Slope Under Human Activities and Critical Rainfall: Case Study of Recife, Brazil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(2). <https://doi.org/10.1007/s10706-024-03011-z>
- Prasetyo Eka Putra, F., Moh Riski, Riyan, Yuyu Rahma Febriani, & Muhammad Umar Mansyur. (2024). Optimization Of Web Based Academic Information System Design To Increase Efficiency In Junior High Schools. *Jurnal Informasi Dan Teknologi*, 150–158. <https://doi.org/10.60083/jidt.v6i2.545>
- Prasetyo Eka Putra, F., Sutarsih, S. R., Sofiyulloh, S., Permana, P., & Umar Mansyur, M. (2024). Optimalisasi Perancangan Aplikasi Manajemen Data Koloman, Di Desa Pulau Mandangin Sampang – Madura Berbasis Website. *Rabit : Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Univrab*, 9(2), 285–294. <https://doi.org/10.36341/rabit.v9i2.4840>
- Prasetyo, F., Putra, E., Riski, M., Yahya, M. S., & Ramadhan, M. H. (2023). Mengenal Teknologi Jaringan Nirkabel Terbaru Teknologi 5G. *Jurnal Sistim Informasi Dan Teknologi*, 5(2), 167–174. <https://jsisfotek.org/index.php>
- Putra, F. P. E., Fauzan, F., Syirofi, S., Mursidi, M., Wahid, D., & Nuraini, A. (2024). Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik. *Digital Transformation Technology*, 3(2), 931–937. <https://doi.org/10.47709/digitech.v3i2.3461>
- Putra, F. P. E., Mahmud, M. A., & Paradina, R. (2024). Comparing the Performance of LoRaWAN and MQTT Protocols for IoT Sensor Networks. *Jurnal Informasi Dan Teknologi*. <https://www.jidt.org/jidt/article/view/565>
- Rangan, P. R., & Tumpu, M. (2022). Marshall Test Characteristics of Ac-Bc Mixture To Determination of Optimum Asphalt Content and Marshall Immersion Index Using Portland Composite Cement As Filler. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(18), 1666–1673. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85164822335&partnerID=40&md5=be3e30b342e9367ef6e56f33470cddc>
- Rios, T. de M. L., Cardoso, L. R. de A., Montelato, B., & Mognhol, T. Z. (2024). Bridge Information Modeling (BrIM) used in the operation and maintenance of Civil Engineering Structures (CESS). *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 17(3). <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000300004>
- Saboo, N., Mehta, D., Sharma, A., & Kumar, R. (2024). Development of aggregate gradation based on asphalt film thickness and aggregate structure. *Construction and Building Materials*, 440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137424>
- Safhi, A. el M., Amar, H., El Berdai, Y., El Ghorfi, M., Taha, Y., Hakkou, R., Al-Dahhan, M., & Benzaazoua, M. (2022). Characterizations and potential recovery pathways of phosphate mines waste rocks. *Journal of Cleaner Production*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134034>
- Saha, S., & karmakar, S. (2024). Failure mode and response of a typical RC straight and skew highway girder bridge under the blast, wrapped with and without a non-Explosive Reactive armour using FEM-SPH coupling. *Engineering Failure Analysis*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108330>
- Shen, K., & Wang, H. (2025). Impact of Wide-Base Tire on Flexible Pavement Responses: Coupling Effects of Multiaxle and Dynamic Loading. *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, 151(1). <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1558>
- Sihombing, A. V. R., Utami, R., Somantri, A. K., Febriansya, A., Sihombing, R. P., & Mulyadi, A. M. (2023). Stone Matrix Asphalt Performance with Glycerin Pitch as Asphalt Binder Extender. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 582–595. <https://doi.org/10.3311/PPci.21817>
- Sun, J., Oh, E., Ma, Z., Bell, P., & Ong, D. E. L. (2025). Impact of HWD dynamic loading on measured deflection basins and back-calculated stiffnesses of flexible airport pavements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116390>
- Tang, K., Qiu, J., Lai, J., Xue, F., Wang, Z., & Li, X. (2025). Experimental investigation on deformation-failure mechanisms of a shallow-bias large-section loess tunnel induced by rainfall. *Tunnelling and Underground Space*

- Technology*, 157.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106253>
- Tangga, A. A., Mufargi, H. A. L., Milad, A., Ali, A. A., Al-Sabaei, A. M., & Md Yusoff, N. I. (2024). Utilising machine learning algorithms to predict the Marshall characteristics of asphalt pavement layers. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(10).  
<https://doi.org/10.1007/s41062-024-01698-w>
- Vimalkumar, S., & Latha, R. (2025). Advanced Soil Moisture Predictive Methodology in the Maize Cultivation Region. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 15(1), 19966–19970. <https://doi.org/10.48084/etasr.9059>
- Vinod, D., & Mahesha, A. (2025). Spatial Dependence of Extreme Rainfall and Development of Intensity-Duration-Frequency Curves Using Max-Stable Process Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 30(1).  
<https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6326>
- Wang, Z., Liu, X., Huang, Y., Zhang, P., & Fu, Y. (2023). A multivariate time series graph neural network for district heat load forecasting. *Energy*, 278.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127911>
- Yang, Z., Zhan, M., Liu, D., Ye, C., Cao, K., & Cheng, S. (2023). Small-Signal Synchronous Stability of a New-Generation Power System With 100% Renewable Energy. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(5), 4269–4280.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3214484>
- Yousif, M. A., Zghair, H. H., & Alsaeedi, F. (2024). Optimal design of mechanical performances of asphalt mixtures comprising nano-clay additives. *Open Engineering*, 14(1).  
<https://doi.org/10.1515/eng-2022-0586>