



Studi Literatur Karakteristik Fisik dan Mekanik Aspal Modifikasi Berdasarkan Hasil Uji Laboratorium (Periode 2020–2025)

Wenny Herdianti ^{1*}, I Wayan Putra Jayantara ², Arrisha Anggarini ³, Ivana Christine Sembiring Brahmana ⁴, Melvi Maulita Napitupulu ⁵, A. Daniel Anderson Munthe ⁶

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia

^{3,4,5,6} Program Studi Manajemen Konstruksi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia

Email: wenny@unimed.ac.id ¹, pjayantara@unimed.ac.id ², arrisha@unimed.ac.id ³, ivanacs@unimed.ac.id ⁴, melvimaulita@unimed.ac.id ⁵, danielmunthe@unimed.ac.id ⁶

Abstrak

Aspal konvensional masih memiliki keterbatasan dalam menahan peningkatan beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan, yang dapat menyebabkan deformasi permanen, retak, serta penurunan umur layanan perkerasan jalan. Berbagai penelitian telah mengembangkan aspal modifikasi untuk meningkatkan kinerja perkerasan, namun hasil penelitian tersebut masih tersebar dan belum tersintesis secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan mengkaji karakteristik fisik dan mekanik aspal modifikasi berdasarkan hasil pengujian laboratorium melalui metode Systematic Literature Review (SLR). Data diperoleh dari Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, dan jurnal nasional terindeks SINTA pada periode 2020–2025. Hasil pencarian awal menghasilkan 85 artikel, dan setelah proses seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi diperoleh 11 artikel yang dianalisis. Data yang ditinjau meliputi karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan bahan modifikasi seperti polimer, karet, nanomaterial, dan limbah plastik secara umum mampu meningkatkan titik leleh, stabilitas Marshall, dan ketahanan terhadap deformasi permanen. Namun, peningkatan kekakuan pada beberapa jenis modifikasi berpotensi mengurangi fleksibilitas campuran dan meningkatkan risiko retak pada temperatur rendah. Dengan demikian, aspal modifikasi berpotensi meningkatkan kinerja perkerasan jalan, tetapi pemilihan jenis dan kadar bahan modifikasi perlu disesuaikan dengan kebutuhan teknis agar diperoleh kinerja yang optimal.

Kata Kunci: Aspal Modifikasi; Karakteristik Fisik; Karakteristik Mekanik; Binder; Systematic Literature Review.

ABSTRACT

Conventional asphalt still has limitations in withstanding increasing traffic loads and environmental influences, which can lead to permanent deformation, cracking, and a reduction in pavement service life. Various studies have developed modified asphalt to improve pavement performance; however, the findings remain scattered and have not been comprehensively synthesized. This study aims to examine the physical and mechanical characteristics of modified asphalt based on laboratory testing results using the Systematic Literature Review (SLR) method. Data were collected from Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, and SINTA-indexed national journals published between 2020 and 2025. The initial search yielded 85 articles, and after applying the inclusion and exclusion criteria, 11 articles were selected for analysis. The reviewed data included binder physical characteristics, rheological properties, and the mechanical characteristics of asphalt mixtures. The results indicate that the use of modification materials such as polymers, rubber, nanomaterials, and plastic waste generally improves the softening point, Marshall stability, and resistance to permanent deformation. However, the increased stiffness observed in some modified asphalt types may reduce mixture flexibility and increase the risk of cracking at low temperatures. Therefore, modified asphalt has significant potential to enhance pavement performance, but the selection of modification materials and their dosage should be adjusted to technical requirements to achieve optimal performance.

Keywords: Modified Asphalt; Physical Properties; Mechanical Properties; Polymer; Systematic Literature Review

1. PENDAHULUAN

Pengembangan aspal modifikasi dalam beberapa dekade terakhir telah menjadi salah satu pendekatan strategis yang banyak diteliti dalam bidang teknik perkerasan jalan, khususnya untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan lapisan perkerasan terhadap berbagai kondisi beban dan lingkungan. Aspal konvensional diketahui memiliki keterbatasan dalam menahan deformasi permanen (*rutting*), retak akibat kelelahan (*fatigue cracking*), serta sensitivitas terhadap perubahan suhu ekstrem. Oleh karena itu, berbagai inovasi dilakukan melalui penambahan bahan modifikasi guna memperbaiki karakteristik fisik dan mekanik aspal agar lebih sesuai dengan tuntutan lalu lintas modern yang semakin tinggi dan kompleks.

Berbagai jenis bahan modifikasi telah dikembangkan dan diuji, baik yang berasal dari polimer sintesis, karet alam maupun karet sintesis, limbah industri seperti plastik bekas, hingga material alam lokal yang potensial. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penambahan bahan modifikasi dapat meningkatkan performa campuran aspal dalam berbagai parameter seperti stabilitas Marshall, nilai *flow*, dan ketahanan deformasi (You et al., 2022). Meskipun demikian, hasil penelitian menunjukkan adanya variasi kinerja yang dipengaruhi oleh jenis bahan, kadar campuran, serta metode pengujian yang digunakan. Hal ini menyebabkan perlunya kajian yang lebih komprehensif dan terintegrasi untuk memahami efektivitas masing-masing bahan modifikasi (Zhang et al., 2022). Dalam kurun waktu 2020 hingga 2025, penelitian aspal modifikasi berkembang pesat dengan penekanan pada penggunaan material ramah lingkungan. Berbagai studi menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah plastik, karet bekas, dan nanomaterial mampu meningkatkan stabilitas, ketahanan deformasi, serta durabilitas campuran aspal, sekaligus memberikan kontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan (You et al., 2022)

Di Indonesia, penelitian juga menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik sebagai bahan modifikasi mampu meningkatkan karakteristik Marshall serta kinerja campuran secara keseluruhan (Putra et al., 2020). Namun demikian, meskipun jumlah penelitian mengenai aspal modifikasi terus meningkat, informasi terkait karakteristik aspal modifikasi masih tersebar pada berbagai penelitian dengan fokus yang berbeda-beda. Sebagian penelitian menitikberatkan pada karakteristik fisik binder seperti penetrasi, daktilitas, dan titik lembek, sementara penelitian lainnya lebih berfokus pada sifat reologi maupun karakteristik mekanik campuran seperti stabilitas dan *flow*. Akibatnya, hasil-hasil penelitian tersebut belum memberikan gambaran yang utuh mengenai kinerja aspal modifikasi dari tingkat binder hingga campuran.

Berdasarkan penelusuran literatur, belum terdapat sintesis komprehensif yang mengintegrasikan temuan mengenai karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran dari berbagai penelitian pada periode 2020–2025. Padahal, integrasi ketiga aspek tersebut diperlukan untuk memahami efektivitas berbagai bahan modifikasi secara lebih menyeluruh serta mengidentifikasi kecenderungan perkembangan penelitian yang telah dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dalam bentuk studi literatur untuk mensintesis hasil-hasil penelitian terkait karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi periode 2020–2025, sekaligus mengidentifikasi tren penelitian dan *research gap* yang masih memerlukan pengembangan lebih lanjut.

2. METODE

2.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang dipublikasikan pada periode 2020–2025. Metode SLR dipilih karena memungkinkan proses identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis literatur dilakukan secara sistematis, transparan, dan dapat direplikasi. Sumber data diperoleh dari berbagai basis data ilmiah yang bereputasi, meliputi Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, dan jurnal nasional terindeks SINTA. Artikel yang digunakan merupakan artikel penelitian (*research article*) yang telah melalui proses *peer-review* dan memuat hasil pengujian laboratorium terkait karakteristik aspal modifikasi.

2.2 Sumber Data

Data literatur diperoleh dari basis data ilmiah bereputasi, yaitu Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, serta jurnal nasional terindeks SINTA. Pemilihan beberapa basis data tersebut bertujuan untuk memperoleh cakupan literatur yang luas dari sumber nasional maupun internasional yang relevan dengan topik penelitian. Proses pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti “modified asphalt”, “polymer modified asphalt”, “crumb rubber asphalt”, “nano modified asphalt”, “mechanical properties of asphalt”, dan “laboratory performance of asphalt binder”.

Pencarian dibatasi pada artikel yang dipublikasikan dalam rentang tahun 2020–2025 untuk memastikan literatur yang digunakan mencerminkan perkembangan terkini dalam teknologi aspal modifikasi. Hasil pencarian awal menghasilkan 85 artikel yang berpotensi

relevan. Selanjutnya dilakukan proses seleksi berdasarkan kesesuaian judul, abstrak, tahun publikasi, ketersediaan naskah lengkap (*full text*), serta relevansi terhadap tujuan penelitian. Artikel yang tidak membahas karakteristik fisik binder, sifat reologi, atau karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi dieliminasi dari proses seleksi. Setelah dilakukan proses screening dan evaluasi kelayakan, diperoleh 11 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan digunakan sebagai sumber utama dalam analisis dan sintesis literatur.

2.3 Kriteria Seleksi Literatur

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memastikan bahwa artikel yang dianalisis memiliki relevansi yang tinggi dengan tujuan penelitian serta menyediakan data yang memadai untuk proses sintesis literatur. Artikel yang dipilih harus membahas aspal modifikasi dan menyajikan hasil pengujian laboratorium yang berkaitan dengan karakteristik fisik binder, sifat reologi, atau karakteristik mekanik campuran aspal. Penerapan kriteria tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa artikel yang digunakan memiliki kualitas ilmiah yang baik, relevan dengan fokus penelitian, serta mampu memberikan data yang valid untuk proses analisis dan sintesis literatur. Tabel 1 menyajikan kriteria inklusi dan eksklusi yang digunakan dalam proses seleksi literatur.

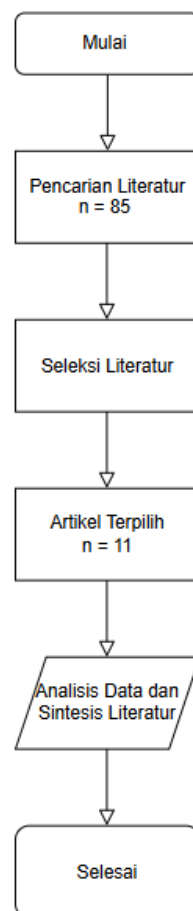
Tabel 1. Kriteria Seleksi Literatur

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel jurnal ilmiah yang dipublikasikan pada periode 2020–2025	Artikel yang dipublikasikan sebelum tahun 2020
Artikel yang telah melalui proses <i>peer-review</i>	Prosiding, skripsi, tesis, laporan teknis, dan buku
Membahas aspal modifikasi dengan berbagai jenis bahan aditif	Tidak membahas aspal modifikasi
Menyajikan hasil pengujian laboratorium	Tidak menyajikan data hasil pengujian laboratorium
<i>Full text</i> dapat diakses	Hanya tersedia abstrak
Menyajikan data karakteristik fisik binder, sifat reologi, atau karakteristik mekanik campuran	Tidak relevan dengan fokus penelitian

2.4 Proses Seleksi dan Ekstraksi Data

Proses seleksi literatur dilakukan menggunakan pendekatan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang terdiri atas empat tahapan, yaitu identifikasi (*identification*), penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), dan penentuan artikel yang digunakan (*included*). Tahapan seleksi literatur ditunjukkan pada Gambar 1. Pada tahap identifikasi diperoleh 85 artikel dari berbagai basis data yang telah ditentukan. Selanjutnya dilakukan proses *screening* berdasarkan judul dan abstrak untuk

menghilangkan artikel yang tidak relevan dengan topik penelitian. Artikel yang lolos tahap screening kemudian dievaluasi secara menyeluruh melalui penelaahan *full text* berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Hasil akhir proses seleksi menghasilkan 11 artikel yang memenuhi kriteria dan digunakan sebagai sumber data dalam penelitian ini. Data dari artikel terpilih kemudian diekstraksi dan dikelompokkan ke dalam tiga kategori analisis, yaitu karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi. Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi pengaruh berbagai bahan modifikasi terhadap karakteristik aspal serta mengkaji tren penelitian yang berkembang pada periode 2020–2025 dalam pemilihan sumber data.



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian diawali dengan proses pencarian literatur pada berbagai basis data ilmiah menggunakan kata kunci yang sesuai dengan topik penelitian. Hasil pencarian awal memperoleh 85 artikel yang berpotensi relevan. Selanjutnya dilakukan proses seleksi literatur berdasarkan kesesuaian judul, abstrak, tahun publikasi, dan isi artikel dengan fokus penelitian.

Artikel yang lolos tahap seleksi kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Hasil proses seleksi menghasilkan 11 artikel yang memenuhi kriteria dan digunakan sebagai sumber data penelitian. Data dari artikel terpilih kemudian diekstraksi dan dikelompokkan ke dalam karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi. Tahap akhir dilakukan analisis dan sintesis literatur untuk mengidentifikasi pengaruh berbagai bahan modifikasi terhadap karakteristik aspal serta menemukan tren penelitian dan *research gap* pada periode 2020–2025.

2.5 Ekstraksi dan Analisis Data

Ekstraksi data dilakukan secara sistematis terhadap 11 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Proses ekstraksi bertujuan untuk memperoleh informasi yang relevan dengan fokus penelitian. Data yang dikumpulkan meliputi:

1. Identitas artikel (penulis dan tahun publikasi)
2. Jenis bahan modifikasi yang digunakan
3. Karakteristik fisik binder (penetrasi, daktilitas, dan titik lembek)
4. Karakteristik reologi aspal (modulus kompleks (G^*), stiffness, dan *m-value*)
5. Karakteristik mekanik campuran aspal (stabilitas Marshall dan *flow*)

Data yang telah diekstraksi kemudian dikelompokkan berdasarkan jenis bahan modifikasi, seperti polimer, karet, plastik, dan nanomaterial. Selanjutnya dilakukan analisis deskriptif-komparatif untuk membandingkan pengaruh berbagai bahan modifikasi terhadap karakteristik fisik binder, sifat reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan karakteristik aspal akibat penggunaan bahan modifikasi, mengevaluasi efektivitas masing-masing jenis modifikasi, serta menemukan tren penelitian dan *research gap* pada periode 2020–2025.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Seleksi dan Karakteristik Umum Artikel

Berdasarkan proses pencarian literatur pada berbagai basis data ilmiah, yaitu Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, dan jurnal nasional terindeks SINTA, diperoleh sebanyak 85 artikel yang berpotensi relevan dengan topik penelitian. Selanjutnya dilakukan proses identifikasi, *screening*, dan evaluasi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Hasil seleksi menunjukkan bahwa sebanyak 11 artikel memenuhi kriteria dan digunakan sebagai sumber data utama dalam penelitian ini.

Artikel yang dianalisis merupakan publikasi periode 2020–2025 yang didominasi oleh jurnal internasional bereputasi serta beberapa jurnal nasional terindeks. Berdasarkan karakteristiknya, penelitian yang dikaji mencakup berbagai jenis bahan modifikasi aspal, seperti polimer (SBS dan EVA), limbah plastik (PE, HDPE, dan LDPE), karet (crumb rubber), serta material berbasis nanoteknologi. Penggunaan bahan-bahan tersebut bertujuan untuk meningkatkan kinerja aspal dalam menghadapi beban lalu lintas yang semakin tinggi serta kondisi lingkungan yang beragam.

Berdasarkan fokus pengujiannya, artikel yang terpilih dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama, yaitu karakteristik fisik binder, karakteristik reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal. Parameter yang paling sering digunakan meliputi penetrasi, daktilitas, titik lembek, modulus kompleks (G^*), stiffness, m-value, stabilitas Marshall, dan *flow*. Pengelompokan ini dilakukan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh bahan modifikasi terhadap kinerja aspal mulai dari tingkat binder hingga campuran.

Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa sebagian besar bahan modifikasi mampu meningkatkan performa aspal dibandingkan aspal konvensional. Pada karakteristik fisik binder, penggunaan bahan modifikasi umumnya meningkatkan titik lembek dan menurunkan nilai penetrasi yang menunjukkan peningkatan kekakuan aspal. Pada karakteristik reologi, beberapa penelitian melaporkan peningkatan modulus kompleks (G^*) dan ketahanan terhadap deformasi permanen. Sementara itu, pada tingkat campuran, peningkatan stabilitas Marshall menunjukkan bahwa aspal modifikasi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan beban lalu lintas.

Meskipun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan beberapa keterbatasan. Peningkatan kekakuan akibat penggunaan polimer atau limbah plastik berpotensi mengurangi fleksibilitas campuran pada kondisi tertentu. Selain itu, beberapa bahan modifikasi dapat meningkatkan viskositas aspal sehingga memerlukan temperatur pencampuran dan pemadatan yang lebih tinggi. Dari aspek implementasi, penggunaan polimer dan nanomaterial juga masih menghadapi kendala biaya yang relatif lebih besar dibandingkan aspal konvensional. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas aspal modifikasi tidak hanya ditentukan oleh peningkatan parameter teknis, tetapi juga perlu mempertimbangkan aspek ekonomi dan kemudahan penerapannya di lapangan. Untuk memudahkan analisis, hasil penelitian dikelompokkan ke dalam tiga aspek utama, yaitu karakteristik fisik binder, karakteristik reologi, dan karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi. Ringkasan hasil penelitian yang dianalisis disajikan pada Tabel 2-4.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Pengujian Karakteristik Fisik Binder Aspal Modifikasi dari Berbagai Penelitian

Judul	Penulis	Jenis Modifikasi Aspal	Penetrasi	Daktilitas (cm)	Titik Lembek (°C)
Peningkatan Performasi Aspal Penetrasi 60/70 dengan Penambahan Serbuk Limbah UPVC	Maghfiroh et al. (2023)	UPVC (Polymer)	68,8	138	65
Preparation and Properties of SBS/REOB-Modified Rejuvenated Asphalt	Cui et al. (2022)	SBS/REOB	64.5	33.4	63,7
Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan Karet Alam Pada Pen 60/70 Terhadap Karakteristik Aspal (Kadar Karet 5%)	Widiyanto et all (2020)	SBS	51	140	54,2
Effects of using carbon nanotubes on thermal and ductility properties of bitumen	Zhang et al. (2021)	Nano Carbon (CNT)	50	50	50
Performance of waste plastic modified asphalt binder	You et al. (2022)	Plastik (PE)	48	60	58

Catatan: Nilai penetrasi, daktilitas, dan titik lembek merupakan hasil pengujian yang dilaporkan oleh masing masing peneliti dengan jenis bahan modifikasi, kadar campuran, dan metode pengujian yang berbeda.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Pengujian Karakteristik Mekanik Aspal (Reologi) Modifikasi dari Berbagai Penelitian

Judul	Penulis	Jenis Aspal	Parameter Rutting (G)*	Stiffnes (MPa)	m-value	Keterangan
Study on Anti-Aging Performance Enhancement of Polymer Modified Asphalt with High Linear SBS Content	Han et al., 2023	SBS + Nano (ZnO, TiO ₂ , SiO ₂) & PPA	Meningkat	-	-	
Preparation and Properties of SBS/REOB-Modified Rejuvenated Asphalt	Cui et al. (2022)	SBS/REOB	Meningkat	39,9	0,447	
Rheological behavior of asphalt binders and fatigue resistance of SMA mixtures modified with nano-silica containing RAP materials under the effect of mixture conditioning	Zhang et al. (2021)	RAP + Nano-silica	Meningkat	-	-	Suhu Tinggi ↑, Ketahanan retak ↑, suhu rendah ↓
Investigation on rheological properties and aging mechanism of asphalt under multiple environmental conditions	Sun et al. (2024)	Modified asphalt	↑	↑	↓	Aging ↑, rutting ↑, fleksibilitas ↓

Keterangan : ↑ Meningkat ↓ Menurun

“-” menunjukkan data tidak tersedia dalam penelitian

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian Karakteristik Campuran Aspal Modifikasi dari Berbagai Penelitian

Judul	Penulis	Jenis Aspal	Stabilitas	Flow
Pengaruh penggunaan limbah plastik sebagai bahan tambah pada campuran AC-WC	Perdana et al. (2023)	AC + PET	1075–1322 kg	2.19–3.04 mm
Assessment of asphalt mixtures modified with HDPE & LDPE	Basheet & Latief (2024)	AC + PE	↑ -167%	2.5–3.5 mm
Performance of HMA modified with plastic waste	Mushtaq et al. (2022)	AC + Plastik (PE/LDPE)	1200–1600 kg	3.0 mm

3.2 Karakteristik Fisik Aspal Modifikasi

Berdasarkan Tabel 2, karakteristik fisik aspal modifikasi menunjukkan variasi yang signifikan pada parameter penetrasi, daktilitas, dan titik lembek sebagai akibat dari penggunaan berbagai jenis bahan modifikasi. Nilai penetrasi yang diperoleh berkisar antara 48 hingga 64,5, yang mencerminkan perubahan tingkat kekerasan aspal akibat penambahan material tertentu. Penurunan nilai penetrasi, seperti yang terjadi pada aspal dengan modifikasi plastik (PE), menunjukkan peningkatan kekakuan material yang berkontribusi terhadap ketahanan terhadap deformasi permanen pada suhu tinggi (Ahmad et al., 2022).

Sebaliknya, penggunaan bahan berbasis polimer seperti SBS cenderung menghasilkan nilai penetrasi yang relatif moderat dengan peningkatan fleksibilitas. Hal ini terlihat dari nilai daktilitas yang lebih tinggi, seperti pada penelitian Al-Azawee et al. (2020) yang mencapai 80 cm. Peningkatan daktilitas menunjukkan kemampuan aspal untuk mengalami deformasi tanpa mengalami keretakan, sehingga berpengaruh positif terhadap ketahanan terhadap retak lelah (*fatigue cracking*) (Zhang et al., 2021).

Selain itu, nilai titik lembek yang meningkat hingga mencapai 65°C menunjukkan bahwa bahan modifikasi mampu meningkatkan stabilitas termal aspal. Aspal dengan titik lembek yang lebih tinggi memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap suhu tinggi dan beban lalu lintas berat, sehingga mampu mengurangi potensi terjadinya *rutting* (Zhang et al., 2021). Secara komparatif, bahan nanomaterial seperti carbon nanotube (CNT) menunjukkan kombinasi sifat yang seimbang antara kekakuan dan fleksibilitas, dengan nilai penetrasi dan daktilitas yang relatif stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa nanomaterial memiliki potensi sebagai bahan modifikasi yang mampu meningkatkan kinerja aspal secara menyeluruh. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jenis bahan modifikasi memiliki pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik fisik aspal, dan pemilihan bahan harus disesuaikan dengan kebutuhan kinerja perkerasan.

3.3 Karakteristik Mekanik Aspal (Reologi)

Berdasarkan Tabel 3, karakteristik mekanik aspal modifikasi yang dianalisis melalui parameter reologi menunjukkan adanya peningkatan kinerja yang signifikan terhadap deformasi dan respons terhadap perubahan suhu. Parameter seperti modulus kompleks (G^*), *stiffness*, dan *m-value* memberikan gambaran mengenai perilaku viskoelastis aspal dalam menahan beban lalu lintas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar bahan modifikasi, seperti SBS, plastik, dan nano-silika, mampu meningkatkan nilai G^* yang berkaitan langsung dengan ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*). Peningkatan ini menunjukkan bahwa aspal menjadi lebih kaku dan memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan bentuk di bawah pengaruh beban dan suhu tinggi (Wang et al., 2022; Zhang et al., 2023). Sebagai contoh, penggunaan SBS/REOB menghasilkan nilai *stiffness* sebesar 39,9 MPa, sedangkan penggunaan plastik (PE) menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu sekitar 45 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi berbasis plastik cenderung meningkatkan kekakuan material secara signifikan, meskipun perlu diperhatikan potensi penurunan fleksibilitas pada suhu rendah (Singh et al., 2021).

Di sisi lain, nilai *m-value* yang berkaitan dengan kemampuan relaksasi tegangan menunjukkan bahwa tidak semua bahan modifikasi memberikan peningkatan yang seimbang antara kekakuan dan fleksibilitas. Nilai *m-value* yang lebih rendah dapat meningkatkan risiko retak pada suhu rendah, sehingga diperlukan kombinasi bahan modifikasi untuk mencapai keseimbangan sifat viskoelastis (Zhang et al., 2021). Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan nanomaterial seperti nano-silika mampu meningkatkan ketahanan terhadap *rutting* sekaligus meningkatkan ketahanan terhadap retak, yang menunjukkan kinerja viskoelastis yang lebih optimal (Zhang et al., 2021). Faktor lingkungan seperti suhu dan penuaan (*aging*) juga terbukti mempengaruhi kinerja aspal modifikasi, di mana beberapa bahan mampu meningkatkan ketahanan terhadap proses penuaan dan menjaga stabilitas kinerja dalam jangka panjang (Yan et al., 2024). Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa modifikasi aspal memberikan peningkatan signifikan terhadap karakteristik mekanik, terutama dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen dan memperbaiki sifat viskoelastis aspal.

3.4 Karakteristik Mekanik Campuran Aspal

Berdasarkan Tabel 4, karakteristik mekanik campuran aspal modifikasi menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan, terutama pada parameter stabilitas Marshall. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan bahan modifikasi seperti limbah plastik, HDPE, LDPE, dan

crumb rubber mampu meningkatkan nilai stabilitas hingga mencapai kisaran 1075–1600 kg. Bahkan, pada penelitian Basheet dan Latief (2024), penggunaan HDPE dan LDPE dilaporkan mampu meningkatkan stabilitas sebesar 150–167% dibandingkan campuran aspal konvensional. Dibandingkan parameter lainnya, stabilitas Marshall merupakan parameter yang paling dominan mengalami peningkatan pada sebagian besar penelitian yang ditinjau. Kondisi ini menunjukkan bahwa bahan modifikasi mampu meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas, mengurangi potensi deformasi permanen, serta memperkuat interaksi antara agregat dan binder (Singh et al., 2021).

Selain itu, nilai *flow* yang berada pada kisaran 2,5–4,0 mm menunjukkan bahwa campuran masih memiliki fleksibilitas yang cukup untuk mengakomodasi deformasi tanpa mengalami kerusakan struktural. Penggunaan *crumb rubber*, misalnya, terbukti mampu meningkatkan fleksibilitas campuran serta ketahanan terhadap retak, sehingga memberikan keseimbangan antara stabilitas dan deformabilitas (Behnood & Olek, 2022). Di sisi lain, penggunaan plastik seperti LDPE dan HDPE cenderung meningkatkan kekakuan campuran, yang berdampak pada peningkatan stabilitas namun berpotensi mengurangi fleksibilitas jika tidak dikontrol dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan optimasi kadar bahan modifikasi agar diperoleh kinerja campuran yang optimal (You et al., 2022). Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa aspal modifikasi tidak hanya meningkatkan karakteristik binder, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap kinerja campuran secara menyeluruh. Peningkatan stabilitas dan pengendalian nilai *flow* menunjukkan bahwa aspal modifikasi memiliki potensi besar sebagai material perkerasan yang lebih tahan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang ekstrem.

3.5 Perbandingan Kinerja Berdasarkan Jenis Bahan Modifikasi

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 1, 2, dan 3, terlihat bahwa setiap jenis bahan modifikasi memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik aspal. Bahan berbasis polimer seperti SBS cenderung meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan terhadap retak, yang ditunjukkan oleh nilai daktilitas yang tinggi serta kinerja viskoelastis yang lebih stabil. Sementara itu, bahan berbasis plastik seperti LDPE dan HDPE menunjukkan peningkatan kekakuan yang signifikan, yang berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*).

Namun, peningkatan kekakuan ini berpotensi menurunkan fleksibilitas jika tidak dikontrol dengan baik. Di sisi lain, penggunaan nanomaterial menunjukkan potensi dalam memberikan keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas, sehingga mampu meningkatkan

kinerja aspal secara menyeluruh. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada satu jenis bahan modifikasi yang unggul dalam semua aspek, sehingga pemilihan bahan harus disesuaikan dengan kebutuhan kinerja perkerasan.

3.6 Implikasi dan Celah Penelitian (Research Gap)

Berdasarkan hasil kajian literatur, diketahui bahwa penelitian mengenai aspal modifikasi telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir, terutama dalam pemanfaatan material ramah lingkungan seperti limbah plastik dan nanomaterial. Namun demikian, masih terdapat beberapa celah penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut. Pertama, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengujian laboratorium dan belum banyak yang mengkaji kinerja jangka panjang di lapangan. Kedua, variasi metode pengujian dan parameter yang digunakan menyebabkan hasil penelitian sulit dibandingkan secara langsung. Ketiga, penelitian mengenai kombinasi bahan modifikasi (*hybrid modification*) masih terbatas, padahal memiliki potensi untuk menghasilkan kinerja yang lebih optimal.

Secara praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan modifikasi dapat menjadi solusi untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan. Penggunaan bahan modifikasi tersebut terutama bermanfaat dalam menghadapi peningkatan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang ekstrem. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang mengarah pada penerapan skala lapangan serta pengembangan standar pengujian yang lebih terintegrasi.

4. PENUTUP

Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil studi literatur sistematis terhadap penelitian aspal modifikasi periode 2020–2025, dapat disimpulkan bahwa penggunaan bahan modifikasi memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan karakteristik fisik dan mekanik aspal. Pada aspek karakteristik fisik, penambahan bahan seperti polimer, plastik, karet, dan nanomaterial mampu meningkatkan titik lembek dan daktilitas, serta menyesuaikan nilai penetrasi sesuai kebutuhan kinerja. Hal ini menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak akibat beban lalu lintas maupun perubahan suhu. Dari sisi karakteristik mekanik (reologi), bahan modifikasi terbukti meningkatkan nilai modulus kompleks (G^*), kekakuan (*stiffness*), serta ketahanan terhadap rutting. Namun demikian, peningkatan kekakuan pada beberapa jenis bahan, khususnya plastik, perlu diimbangi dengan fleksibilitas agar tidak meningkatkan risiko retak pada suhu rendah. Oleh karena itu, keseimbangan sifat viskoelastis menjadi faktor penting

dalam menentukan kinerja aspal modifikasi. Pada tingkat campuran, penggunaan bahan modifikasi menunjukkan peningkatan nilai stabilitas Marshall serta pengendalian nilai flow, yang mengindikasikan peningkatan kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi berlebih. Bahan seperti crumb rubber dan polimer cenderung meningkatkan fleksibilitas, sedangkan plastik meningkatkan kekakuan dan stabilitas campuran. Secara komparatif, setiap jenis bahan modifikasi memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, sehingga tidak terdapat satu bahan yang unggul dalam semua aspek. Pemilihan bahan modifikasi harus disesuaikan dengan kebutuhan kinerja perkerasan, kondisi lingkungan, serta karakteristik lalu lintas. Meskipun penelitian mengenai aspal modifikasi terus berkembang, masih terdapat beberapa celah penelitian, antara lain terbatasnya studi kinerja jangka panjang di lapangan, kurangnya standarisasi metode pengujian, serta minimnya penelitian terkait kombinasi bahan modifikasi (hybrid modification). Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji performa aspal modifikasi pada skala lapangan serta mengembangkan pendekatan pengujian yang lebih terintegrasi dan berbasis kinerja.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., Rahman, M. Y. A., & Karim, M. R. (2022). Performance evaluation of polyethylene modified asphalt binders for high-temperature applications. *Construction and Building Materials*, 342, 127945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127945>
- Basheer, I., & Latief, M. (2024). Assessment of asphalt mixtures modified with HDPE and LDPE. *Materials Today: Proceedings*, 74, 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.120>
- Behnood, A., & Olek, J. (2022). Rheological properties of asphalt binders modified with waste materials: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129807. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129807>
- Cui, S., Blackman, B. R. K., & Kinloch, A. J. (2022). Preparation and properties of SBS/REOB-modified rejuvenated asphalt. *Construction and Building Materials*, 344, 128136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128136>
- Han, S., Zhang, Y., Liu, X., & Wang, H. (2023). Study on anti-aging performance enhancement of polymer modified asphalt with high linear SBS content. *Construction and Building Materials*, 376, 130142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130142>
- Mushtaq, S., Ahmad, N., & Ali, Z. (2022). Performance of hot mix asphalt modified with plastic waste. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01045. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01045>

- Perdana, R., Siregar, M., & Putra, D. (2023). Pengaruh penggunaan limbah plastik sebagai bahan tambah pada campuran AC-WC. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 235–244.
- Putra, A., Siregar, R., & Pratama, D. (2020). Pengaruh limbah plastik terhadap campuran aspal. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 12(2), 45–52.
- Sun, Y., Li, H., Yang, B., Han, Y., & Zou, Z. (2024). Investigation on rheological properties and aging mechanism of asphalt under multiple environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 443, 137713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137713>
- Widianto, B. W., & Faishal, M. I. (2020). Perubahan Karakteristik Aspal Pen 60/70 dengan Substitusi Getah Karet Alam Pangkalan Balai, Sumatera Selatan. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 6(3), 143–154. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v6i3.143>
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q., & Goh, S. W. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>
- Zhang, L., Chen, M., & Wu, S. (2021). Rheological behavior of asphalt binders and fatigue resistance of SMA mixtures modified with nano-silica containing RAP materials. *Construction and Building Materials*, 281, 122130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122130>
- Zhang, Y., Luo, X., Onifade, I., & Huang, X. (2021). Effect of different modifiers on rheological properties of asphalt binders: A review. *Construction and Building Materials*, 290, 123242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123242>