

Interaksi aspal-karet dan evaluasi kinerja pengikat aspal karet

Wildan Zain¹ dan Mega Asih Sukanda Putri²

Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Madura, Pamekasan

ABSTRAK: Teknologi aspal campuran hangat (WMA) semakin banyak digunakan pada perkerasan aspal karet untuk mengurangi temperatur produksi dan pemadatan serta asap dan bau yang ditimbulkan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki kinerja temperatur tinggi, menengah dan rendah dari bahan pengikat aspal yang dimodifikasi dengan karet remah yang mengandung aditif WMA. Interaksi aspal-karet pada berbagai kombinasi suhu dan waktu pencampuran diselidiki dengan metode mikroskopis dan mekanis untuk mendapatkan prosedur pencampuran yang optimal. Efek dari aditif WMA (produk berbasis lilin dan bahan kimia) terhadap kinerja pengikat diselidiki dengan uji stress creep and recovery (MSCR), uji sapuan amplitudo linier (LAS), dan uji sapuan frekuensi temperatur rendah. Hasilnya menunjukkan bahwa pengikat aspal karet secara signifikan meningkatkan kinerja pengikat aspal dasar pada rentang suhu yang berbeda. Pengaruh aditif WMA terhadap kinerja pengikat bervariasi pada aspal dasar dan pengikat aspal karet. Selain itu, perbedaan kepatuhan yang tidak dapat dipulihkan ditemukan tidak sesuai untuk mengkarakterisasi sensitivitas tegangan pengikat aspal karet dan perbedaan kepatuhan yang tidak dapat dipulihkan untuk perubahan tambahan pada tegangan yang diterapkan terbukti menjadi alternatif yang lebih akurat. Untuk uji LAS siklik, energi kegagalan ditemukan memiliki korelasi yang kuat dengan umur fatik yang diprediksi dengan menggunakan analisis kerusakan kontinum viskoelastik yang disederhanakan dan oleh karena itu dapat dianggap sebagai indikator sederhana untuk peringkat kinerja fatik pengikat.

Kata Kunci: pengubah karet ; aspal campuran ; MSCR; LAS; frekuensi

1. PENDAHULUAN

Menurut laporan European Environment Agency pada tahun 2015, sektor transportasi menyumbang 25,8% dari total emisi gas rumah kaca (GRK) Uni Eropa (EEA, 2017). Dengan berlakunya perjanjian iklim Paris, sektor transportasi global menghadapi tekanan antar negara untuk mengurangi emisi GRK dan konsumsi bahan bakar fosil. Sementara itu, dengan perkembangan transportasi dan meningkatnya jumlah kendaraan di jalan raya, jutaan ban habis masa pakainya (ELT) diproduksi setiap tahunnya. Meningkatnya kesadaran lingkungan telah mendorong masyarakat untuk mencari cara yang tepat untuk menangani dan membuang ban bekas, seperti vulkanisir, daur ulang energi, dan daur ulang material. Pada tahun 2013, 96% dari ban bekas (3,6 juta ton) telah dipulihkan dan didaur ulang di Uni Eropa (ETRMA, 2016), yang menegaskan Uni Eropa sebagai pemimpin dalam pengelolaan sampah

Di antara infrastruktur transportasi, konstruksi jalan selalu menjadi konsumen energi dan sumber daya yang besar. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pengaspalan yang berkelanjutan dengan konsumsi sumber daya dan energi yang lebih sedikit serta emisi gas rumah kaca yang lebih sedikit menjadi perhatian utama bagi lembaga transportasi dan masyarakat umum. Teknologi beton aspal karet telah diterapkan dalam industri pengaspalan jalan selama beberapa dekade. Teknologi ini tidak hanya memecahkan masalah pembuangan ban bekas tetapi juga meningkatkan kinerja keseluruhan perkerasan aspal dengan nilai tambah [1], [2], [3], [4]. Teknologi aspal campuran hangat (WMA) dikembangkan untuk mengurangi suhu konstruksi perkerasan aspal dan dengan demikian mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca [1], [2], [5]; Asosiasi Perkerasan Aspal Nasional, 2008). Menggabungkan WMA dengan teknologi aspal gosok tidak hanya mengurangi suhu produksi dan pemadatan karena viskositas yang tinggi dari bahan pengikat aspal gosok, namun juga memberikan kondisi kerja yang lebih baik dengan berkurangnya bau dan asap.

Efek individual dari pengubah karet remah (CRM) dan berbagai aditif campuran hangat terhadap sifat pengikat

telah diselidiki secara ekstensif [6], [7], [8]. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara aspal dan karet serta pengaruhnya terhadap sifat akhir aspal modifikasi karet remah (crumb rubber modified asphalt/CRMA) bergantung pada parameter bahan baku (misalnya komposisi aspal, jenis CRM, morfologi, ukuran partikel dan dosis) dan kondisi interaksi (misalnya suhu pencampuran, waktu dan kecepatan pencampuran, jenis energi pencampuran mekanis yang digunakan) [9], [10], [11], [12]. Dua mekanisme interaksi utama yang terlibat dalam produksi bahan pengikat CRMA adalah pembengkakan partikel karet dan degradasi kimiawi (devulkanisasi dan/atau depolimerisasi) pada matriks bahan pengikat [13], [14]. Penggabungan CRM ke dalam pengikat aspal dilaporkan dapat meningkatkan kinerja perkerasan secara keseluruhan, misalnya ketahanan yang lebih tinggi terhadap rutting, penuaan, kelelahan, dan retak termal [15]. Bahan ini juga meningkatkan ketahanan selip pada perkerasan dan mengurangi kebisingan lalu lintas [16], [17], [18], yang memberikan kondisi berkendara yang aman dan nyaman. Lebih penting lagi, terbukti bahwa perkerasan aspal karet dapat didaur ulang dengan menggunakan peralatan dan praktik konvensional dengan sedikit modifikasi (California DOT, 2005). Pengaruh teknologi WMA terhadap kinerja material aspal bervariasi tergantung pada jenis teknologi WMA yang digunakan [19], [20], [21]. Namun demikian, pengaruh aditif WMA terhadap bahan pengikat aspal yang dimodifikasi dengan karet remah belum teridentifikasi dengan jelas. Interaksi antara aspal dan karet, serta aditif WMA, memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja mekanis dan daya tahan perkerasan aspal karet campuran hangat [22], [23]. Karena hubungan yang rumit antara masing-masing komponen campuran aspal karet campuran hangat, maka sangat penting untuk memahami interaksinya dalam bahan pengikat karet sebelum mengaplikasikannya pada tingkat desain campuran. Dengan desain material yang dioptimalkan dan evaluasi kinerja yang dapat diandalkan, aspal karet campuran hangat diyakini sebagai teknologi perkerasan jalan yang berkelanjutan dengan manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial yang luar biasa [24], [25]

Spesifikasi bahan pengikat yang terkait dengan kinerja saat ini terutama dikembangkan untuk bahan pengikat yang tidak dimodifikasi dan didasarkan pada sifat viskoelastik linier bahan. Sebagai contoh, ketahanan rutting dari bahan pengikat aspal di Superpave ditentukan berdasarkan kriteria pembatas pada parameter minimum. parameter minimum ($|G^*| / \sin \delta$) yang diperoleh pada temperatur tinggi. Ketahanan leleh dari bahan pengikat aspal diatasi dengan memberikan batas maksimum pada parameter ($|G^*| - \sin \delta$) pada temperatur menengah. Namun, telah terbukti bahwa dua sudut fase modulus kompleks Parameter berbasis bahan pengikat aspal yang diperoleh dengan Dynamic Shear Rheometer (DSR) memiliki korelasi yang buruk dengan kinerja campuran/perkerasan, terutama untuk bahan pengikat yang dimodifikasi yang sering menunjukkan ketahanan kerusakan yang lebih baik (Bahia dkk., 2001). Oleh karena itu, sejumlah metode pengujian baru telah diusulkan dalam beberapa tahun terakhir untuk karakterisasi kerusakan bahan pengikat aspal dengan mempertimbangkan viskoelastisitas non-linier. Diantaranya, pengujian multiple stress creep and recovery (MSCR) dan pengujian linear amplitude sweep (LAS) pada bahan pengikat aspal terbukti lebih berhasil dalam mengkorelasikan kinerja campuran dan telah diusulkan untuk menyediakan metode pengujian dan analisis yang efisien untuk mengukur ketahanan terhadap rutting pada temperatur tinggi dan ketahanan terhadap kelelahan pada temperatur menengah (D'Angelo & Dongré, 2009; Hintz & Bahia, 2013; Hintz, Velasquez, Johnson, & Bahia, 2011; Masad, Huang, D'Angelo, & Little, 2009). Dalam hal uji kinerja suhu rendah, DSR 4 mm yang baru-baru ini dikembangkan dengan menggunakan pelat paralel berdiameter 4 mm diusulkan sebagai alternatif dengan sejumlah keunggulan dibandingkan dengan bending beam rheometer (BBR) (FHWA, 2017). Oleh karena itu, pada prinsipnya, sifat pengikat aspal pada seluruh rentang temperatur dapat dikarakterisasi hanya dengan menggunakan satu instrumen DSR dengan aksesori yang berbeda (pelat berdiameter 4, 8, dan 25 mm). Pemilihan ukuran pelat paralel umumnya tergantung pada suhu pengujian. Metode DSR terpadu ini diyakini sebagai terobosan teknis yang memungkinkan peningkatan kemampuan untuk memberikan spesifikasi terkait kinerja untuk bahan pengaspalan jalan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

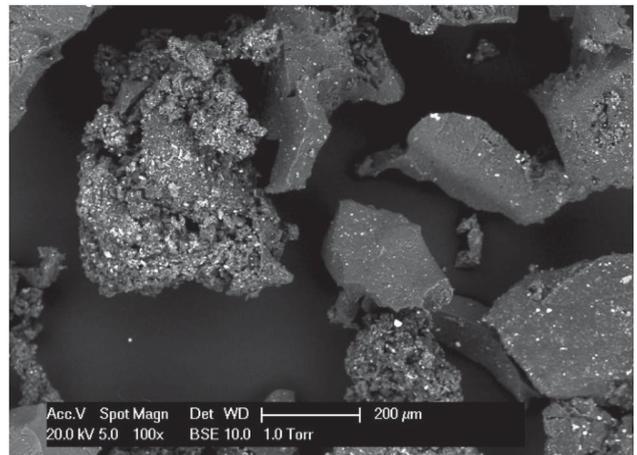
Untuk memperjelas, "aspal" dalam tulisan ini mewakili pengikat dan bukan campuran. Aspal dasar dengan tingkat penetrasi 70/100 yang umum digunakan di Belanda disediakan oleh NYNAS. Fraksi SARA dari aspal dasar adalah 7% untuk jenuh, 51% untuk aromatik, 22% untuk resin, dan 20% untuk aspal. CRM penggilingan ambient memiliki ukuran partikel mulai dari 0 hingga 0,5 mm. Sifat dasar dan komposisi CRM ditunjukkan pada Tabel 1. Morfologi CRM yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui Environment Scanning Electron Microscopy (ESEM) pada Gambar 1(a). Gambar ESEM mengkonfirmasi bahwa partikel karet dari penggilingan ambient memiliki bentuk yang tidak beraturan dan penampilan yang halus dengan luas permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel kriogenik. Dilaporkan

bahwa luas permukaan yang besar akan meningkatkan interaksi aspal dan karet, menyebabkan penyerapan komponen ringan dari aspal ke dalam karet lebih cepat, yang akan meningkatkan sifat-sifat pengikat akhir [26], [27].

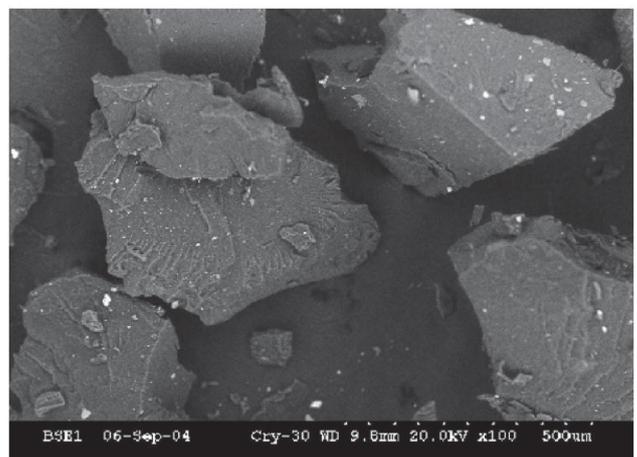
Tabel 1. Sifat-sifat dasar CRM.

Properti	Deskripsi atau nilai
Sumber	Ban bekas truk
Warna	Hitam
Morfologi	Berpori
Berat jenis (g/cm ³)	1.15
Suhu penguraian (°C)	~ 200
Total karet (alami dan sintetis)	55
Karbon Hitam (%)	30
Seng oksida (%)	1.5
Belerang (%)	1
Ekstraksi benzena (%)	5.5
Kandungan abu (%)	7

Penelitian ini mencakup dua jenis aditif WMA non-berbusa, produk berbasis lilin **W** dan produk berbasis bahan kimia **C**. Aditif **W** adalah lilin mikrokristalin sintetis yang bebas dari sulfur dan kotoran lainnya. Aditif **C** adalah paket produk kimia cair, seperti surfaktan, polimer, aditif, bahan anti-pengupasan, dll.



(a)



(b)

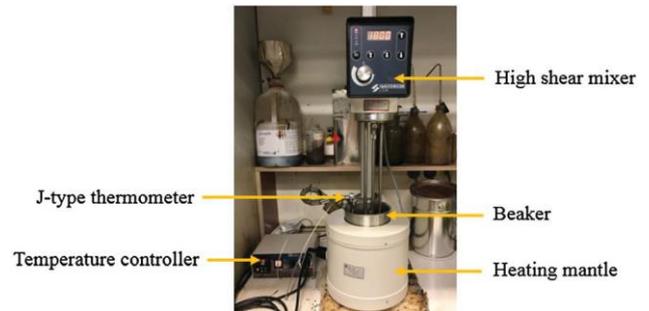
Gambar 1. Gambar ESEM dari CRM yang diproses dengan (a) penggilingan ambien (b) penggilingan kriogenik, diadaptasi dari (Shen & Amirkhanian, 2007).

Untuk mendapatkan pengamatan visualisasi interaksi antara aspal dan karet, ESEM dengan spektroskopi sinar-X dispersif energi (EDX) digunakan untuk menyelidiki morfologi dan komposisi elemen aspal dan karet serta campurannya. Berdasarkan uji coba, sulit untuk melihat perbedaan morfologi antara pengikat CRMA yang berbeda yang dihasilkan pada kondisi interaksi yang berbeda ketika menggunakan partikel CRM halus dalam penelitian ini. Hal ini dikarenakan hasil pengamatan sangat bergantung pada sampel pengikat yang diambil dari batch. Tidak mungkin untuk menjamin ukuran partikel karet yang seragam dalam matriks pengikat antara sampel yang berbeda. Oleh karena itu, sebuah cara alternatif digunakan untuk menyelidiki efek suhu dan waktu pada interaksi aspal-karet. Suatu jenis metode pengecoran panas yang dikembangkan oleh Mikhaillencko dkk. [28], [29] digunakan untuk menyiapkan sampel untuk uji ESEM. Aspal dasar yang disimpan di dalam wadah pertama-tama dipanaskan pada suhu 110°C selama kurang lebih 1 jam untuk kemudian digunakan. Sekitar 0,1 g aspal diekstraksi dari wadah ke dalam tempat sampel berbentuk silinder (diameter 9,5 mm dan tinggi 5,2 mm) dengan menggunakan spatula. Tempat sampel kemudian ditempatkan di atas pemanas dengan suhu 150°C selama sekitar 10 detik untuk meratakan sampel. Untuk mempersiapkan campuran karet aspal untuk interaksi, sejumlah kecil partikel CRM disebarkan dengan hati-hati pada permukaan aspal pada holder pada suhu 110°C.

Setelah mendapatkan gambar SEM dan spektrum EDX dari sampel campuran aspal-karet pada kondisi referensi, sampel-sampel ini dipanaskan pada suhu 160°C, 180°C, 200°C selama 30 menit. Kemudian sampel yang telah dipanaskan kembali menjalani analisis ESEM.

Setelah menyiapkan pengikat CRMA menggunakan prosedur pencampuran yang dioptimalkan, setiap aditif WMA dicampur dengan pengikat dasar dan pengikat CRMA pada suhu 140 ° C. Perlu disebutkan bahwa aditif WMA tidak berpartisipasi dalam interaksi aspal dan CRM pada suhu tinggi. Persentase W berbasis lilin dan C berbasis bahan kimia adalah 2,0% dan 0,6% untuk aspal dasar dan pengikat CRMA, yang ditentukan berdasarkan dosis yang direkomendasikan oleh produsen dan uji pendahuluan. Oleh karena itu, total ada enam jenis bahan pengikat aspal yang disiapkan untuk karakterisasi kinerja, yaitu 70/100, 70/100-W, 70/100-C, CRMA, CRMA-W, dan CRMA-C. Untuk menyelidiki pengaruh aditif WMA terhadap sifat reologi bahan pengikat, semua sampel bahan pengikat diuji dalam keadaan segar tanpa prosedur penuaan buatan.

Untuk aspal dasar dan CRM tertentu, interaksi aspal dan karet merupakan fungsi dari suhu pencampuran, waktu dan laju pencampuran. Karena laju pencampuran memiliki efek yang sama dengan waktu pencampuran [26], [30], [31], [32],



Gambar 3. Peralatan laboratorium yang digunakan untuk menyiapkan pengikat CRMA

hanya dua variabel interaksi (suhu dan waktu) yang dipertimbangkan dalam penelitian ini untuk menentukan prosedur pencampuran yang dioptimalkan untuk menghasilkan pengikat CRMA yang diinginkan. Dosis CRM ditetapkan sebesar 18% dari berat total campuran berdasarkan penelitian sebelumnya [22], [24], [25]. Pengadukan manual selama 5 menit dilakukan untuk mendistribusikan CRM di dalam aspal dasar, kemudian campuran dicampur menggunakan mixer geser tinggi Silverson (Gambar 3) dengan kecepatan 6000 rpm dengan kombinasi suhu dan waktu yang berbeda. Tiga tingkat suhu interaksi dipilih: 160°C, 180°C, dan 200°C. Pada setiap suhu, waktu pencampuran yang berbeda, 30, 60, 90 menit diterapkan untuk campuran CRMA.

Setelah menyiapkan pengikat CRMA menggunakan prosedur pencampuran yang dioptimalkan, setiap aditif WMA dicampur dengan pengikat dasar dan pengikat CRMA pada suhu 140 ° C. Perlu disebutkan bahwa aditif WMA tidak berpartisipasi dalam interaksi aspal dan CRM pada suhu tinggi. Persentase W berbasis lilin dan C berbasis bahan kimia adalah 2,0% dan 0,6% untuk aspal dasar dan pengikat CRMA, yang ditentukan berdasarkan dosis yang direkomendasikan oleh produsen dan uji pendahuluan. Oleh karena itu, total ada enam jenis bahan pengikat aspal yang disiapkan untuk karakterisasi kinerja, yaitu 70/100, 70/100-W, 70/100-C, CRMA, CRMA-W, dan CRMA-C. Untuk menyelidiki pengaruh aditif WMA terhadap sifat reologi bahan pengikat, semua sampel bahan pengikat diuji dalam keadaan segar tanpa prosedur penuaan buatan.

Uji LAS baru-baru ini diusulkan untuk karakterisasi kelelahan yang dipercepat pada pengikat aspal (AASHTO TP 101-14). Uji LAS terdiri dari pembebanan siklik yang menggunakan amplitudo regangan yang meningkat secara sistematis dan linier. Sapuan amplitudo dilakukan dengan menggunakan DSR dengan geometri pelat paralel 8 mm standar pada frekuensi 10 Hz. Regangan ditingkatkan secara linier dari 0,1-30% selama 3100 siklus pembebanan untuk menginduksi kerusakan fatik pada tingkat yang dipercepat. Sebelum uji LAS, uji sapuan frekuensi juga dilakukan pada spesimen yang sama untuk mendapatkan sifat viskoelastik linier yang tidak rusak pada material. Uji sapuan frekuensi menggunakan beban konstan sebesar 0,1% regangan pada rentang frekuensi 0,2-30 Hz. Suhu uji LAS dipilih pada suhu 25°C. Pemodelan kerusakan kontinum viskoelastik yang disederhanakan (S-VECD) dapat diterapkan pada hasil uji LAS untuk mengukur

kerusakan dan memprediksi umur kelelahan pada amplitudo regangan apa pun yang diinginkan [25].

DSR 4 mm yang baru dikembangkan, yang mengacu pada pelaksanaan uji sapuan frekuensi dengan pelat paralel berdiameter 4 mm, dapat secara andal menentukan sifat viskoelastik linier suhu rendah untuk menyediakan metode uji spesifikasi pengikat terkait kinerja. Konsep umum dari teknik ini adalah untuk menetapkan korelasi antara kekakuan mulur bending beam rheometer (BBR) dan modulus relaksasi geser dari DSR serta antara tingkat relaksasi semu yang sesuai [22], [23], [29]. Mempertimbangkan kondisi iklim di Belanda, uji sapuan frekuensi dibentuk dari 0,1-100 rad/s pada suhu rendah yang berbeda (-10°C, 0°C dan 10°C) dengan DSR yang diperbarui dari Anton Paar yang dapat melakukan koreksi kesesuaian instrumen secara real-time online. Sebelum uji sapuan frekuensi, uji sapuan amplitudo regangan dilakukan untuk mengidentifikasi rentang viskoelastik linier (LVE) dari pengikat yang berbeda dan dengan demikian untuk memastikan uji sapuan frekuensi dilakukan dalam wilayah respons LVE pengikat. Berdasarkan batas LVE, semua pengukuran dilakukan pada tingkat regangan 0,1% di bawah mode yang dikontrol regangan. Kemudian kurva master pada suhu referensi - 10°C dibuat untuk analisis parameter suhu rendah selanjutnya

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi dan komposisi unsur CRM dianalisis dengan menggunakan gambar ESEM dan spektrum EDX. Spektrum EDX disajikan sebagai plot jumlah sinar-X versus energi (keV). Puncak energi yang sesuai dengan berbagai elemen dalam sampel juga ditampilkan. Perlu dicatat bahwa unsur yang lebih ringan dari nomor atom Na tidak dapat dideteksi. Permukaan aspal sangat homogen kecuali beberapa pengotor dan terutama mengandung unsur C dan S. Sebaliknya, CRM mengandung berbagai senyawa kimia (mis. seng, besi, silikon, dll.) yang tidak dimiliki oleh aspal biasa.

Untuk menyelidiki interaksi aspal-karet pada temperatur yang berbeda, gambar ESEM dari sampel pada kondisi interaksi yang berbeda, dari partikel karet terlihat tajam dan jelas pada kondisi referensi, permukaan antara aspal dan karet menjadi tidak jelas setelah 30 menit interaksi pada suhu 160°C yang diilustrasikan oleh elips putih. Pembengkakan karet sampai batas tertentu juga teramati. Dengan meningkatnya suhu interaksi hingga 180°C, semakin banyak partikel karet yang larut ke dalam matriks aspal. Pada suhu 200°C, sulit untuk menemukan pulau-pulau partikel karet dan untuk mendefinisikan antarmuka antara aspal dan karet. Hal ini jelas menunjukkan bahwa suhu tinggi dapat meningkatkan pencernaan CRM ke dalam aspal. Analisis unsur juga dilakukan pada sampel yang direaksikan. Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa beberapa unsur baru (misal: Zn, Cu, Si) yang berasal dari CRM muncul pada matriks aspal setelah interaksi pada suhu 160°C selama 30 menit. Selain itu, jumlah unsur C dalam matriks aspal yang berinteraksi meningkat dibandingkan dengan aspal dasar. Hal ini mengkonfirmasi bahwa pertukaran komponen antara aspal dan karet terjadi selama interaksi. Hasil pada suhu lain juga

menunjukkan temuan yang serupa. Pengamatan visual dapat memberikan informasi langsung mengenai interaksi yang terjadi. Namun demikian, sifat mekanik dari pengikat aspal karet masih belum diketahui, sehingga perlu dilakukan karakterisasi sifat untuk mendapatkan pemahaman lebih lanjut mengenai interaksi yang terjadi.

Dari hasil pengujian MSCR sebelumnya dengan berbagai bahan pengikat aspal yang dimodifikasi, diketahui bahwa metode pengujian MSCR sensitif terhadap struktur mikro dari bahan pengikat yang dimodifikasi [24], [25]. Diharapkan uji MSCR juga dapat digunakan untuk mengkarakterisasi perubahan mikrostruktur pengikat CRMA pada berbagai kondisi interaksi. Dalam penelitian ini, sampel uji untuk MSCR disiapkan dan dicetak segera setelah interaksi untuk menghindari pemanasan ulang pengikat CRMA yang telah dipadatkan, yang dapat menyebabkan potensi interaksi di dalam pengikat dan oleh karena itu menghasilkan hasil yang membingungkan. Tiga ulangan disiapkan untuk setiap sampel.

Gambar 3 menunjukkan plot tipikal siklus creep dan recovery pada 3,2 kPa. Untuk mempersingkat waktu, hanya hasil pengikat CRMA yang dibuat dengan pencampuran selama 30 menit yang ditampilkan. Efek interaksi pada perilaku creep dan recovery pengikat CRMA diidentifikasi dengan jelas oleh respon tegangan-regangan yang berbeda. Alasan dari respon yang berbeda tersebut dijelaskan sebagai berikut. Secara khusus, nilai MSCR J_{nr} dan persentase pemulihan pengikat CRMA dengan kombinasi interaksi yang berbeda pada 3,2 kPa diilustrasikan pada Gambar 3. Secara umum, baik J_{nr} maupun persentase perolehan kembali menunjukkan tren yang berbeda dengan meningkatnya temperatur interaksi, yang mengimplikasikan bahwa mungkin ada mekanisme interaksi yang berbeda yang terjadi selama proses pencampuran. Pada suhu yang relatif rendah yaitu 160°C, pembengkakan partikel karet terus menerus terjadi selama periode interaksi yang diilustrasikan dengan penurunan nilai compliance secara terus menerus. Partikel karet mengalami pembengkakan akibat penyerapan minyak aromatik dari matriks aspal sehingga membentuk struktur seperti gel. Perubahan volume partikel karet dan pembentukan struktur gel pada pengikat mengurangi jarak antara partikel karet yang membengkak, dan karenanya memperkuat material komposit. Pada suhu menengah 180°C, baik J_{nr} maupun recovery hanya mengalami perubahan yang terbatas. Kurva datar menunjukkan pengikat CRMA yang berinteraksi pada suhu 180°C mencapai keseimbangan tertentu. Berdasarkan penelitian sebelumnya [33], diketahui bahwa pada tingkat suhu ini, pembengkakan terjadi lebih cepat dibandingkan dengan suhu 160°C. Karena pengikat CRMA yang dibuat pada suhu 180°C selama 30 menit menunjukkan J_{nr} yang sama dengan yang dibuat pada suhu 160°C selama 90 menit, maka ada kemungkinan bahwa pembengkakan mencapai tingkat yang sama pada suhu 180°C selama 30 menit seperti pada suhu 160°C selama 90 menit. Setelah interaksi selama 30 menit pada suhu 180°C, sebuah

Jumlah partikel karet yang membengkak mulai terdepimerisasi, melepaskan beberapa komponen polimer ke dalam matriks aspal. Meskipun J_{nr} sedikit

meningkat, persentase pemulihan juga sedikit meningkat, yang mengindikasikan pengikat menjadi lebih elastis. Pada suhu tinggi 200°C, partikel karet mencapai kesetimbangan pembengkakan dalam waktu yang sangat singkat [34], [35]. Umumnya, swelling polimer elastomer (karet) dalam pelarut organik (minyak aromatik) merupakan proses difusi. Dengan meningkatnya suhu, koefisien difusi juga meningkat, yang mempercepat proses pembengkakan. Perhatikan dari Tabel 1 bahwa suhu dekomposisi CRM adalah sekitar 200°C, peningkatan yang signifikan dari J_{nr} dan penurunan persentase pemulihan pada suhu 200°C terutama disebabkan oleh depolimerisasi dan / atau devulkanisasi partikel karet. Degradasi partikel karet pada suhu tinggi merusak jaringan polimer dan struktur ikatan silang, sehingga menghasilkan respon yang kurang elastis. Selain itu, potensi penuaan pengikat pada suhu tinggi juga dapat menyebabkan peningkatan J_{nr} dan penurunan persentase pemulihan.

Analisis di atas dengan jelas menunjukkan efek dominan dari temperatur pada proses pembengkakan dan degradasi partikel karet. mengilustrasikan tahapan interaksi aspal-karet yang berbeda dengan meningkatnya temperatur dan waktu interaksi. Awalnya, pada temperatur rendah, pembengkakan partikel karet secara terus menerus terjadi dengan kecepatan rendah untuk membentuk material seperti gel (Tahap 1). Dengan meningkatnya temperatur, partikel karet membengkak dengan cepat dan mencapai kesetimbangan pembengkakan dengan cepat (Tahap 2). Pada tahap ini, hanya terjadi degradasi terbatas pada partikel karet. Ketika suhu mencapai tingkat tinggi tertentu, degradasi partikel karet yang membengkak terjadi secara drastis (Tahap 3). Pengamatan di sini berkorelasi dengan baik dengan investigasi ESEM.

Berdasarkan analisis di atas, pencampuran aspal dan karet pada suhu 180°C selama 30 menit dipilih sebagai prosedur interaksi aspal-karet yang dioptimalkan, yang menghasilkan pengikat CRMA dengan J_{nr} yang lebih rendah dan persentase pemulihan yang lebih tinggi. Selain itu, dari segi praktis, interaksi aspal-karet lebih stabil pada suhu 180°C dengan bertambahnya waktu interaksi, sehingga memudahkan dalam pengawasan kualitas produk CRMA di pabrik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyelidiki interaksi aspal-karet pada berbagai kombinasi pencampuran suhu dan waktu. Pengaruh dari dua aditif WMA terhadap kinerja aspal dasar dan pengikat CRMA pada temperatur tinggi, menengah dan rendah juga diperiksa menggunakan MSCR, LAS dan uji sapuan frekuensi temperatur rendah. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Interaksi aspal-karet sangat bergantung pada suhu pencampuran dan waktu. Dengan meningkatnya suhu interaksi, terjadi pembengkakan dan degradasi partikel karet terjadi secara berurutan. Kondisi interaksi aspal-karet optimum ditentukan pada suhu

pencampuran 180°C selama 30 menit, yang menghasilkan pengikat CRMA dengan tingkat kepatuhan yang tidak dapat dipulihkan yang lebih rendah dan persentase pemulihan yang lebih tinggi berdasarkan pengujian MSCR.

- Parameter $J_{nr,diff}$ tidak cocok untuk mengkarakterisasi sensitivitas tegangan pengikat yang dimodifikasi dengan karet gosok. Parameter alternatif yang didefinisikan sebagai perubahan J_{nr} dibagi dengan kenaikan tegangan yang diberikan adalah indikator yang lebih akurat untuk sensitivitas tegangan.
- Bahan pengikat CRMA menunjukkan kinerja temperatur tinggi dan kinerja fatik yang lebih baik daripada aspal dasar akibat modifikasi karet. CRMA juga mengurangi kekakuan aspal pada suhu rendah yang menguntungkan.
- Efek aditif WMA terhadap rutting, kelelahan dan ketahanan retak suhu rendah pada aspal dasar berbeda dengan bahan pengikat CRMA. Aditif berbasis lilin meningkatkan kinerja suhu tinggi dan kinerja kelelahan aspal dasar tetapi memperburuk kinerja suhu rendah. Bahan aditif berbasis kimia sedikit menurunkan ketahanan terhadap rutting dan meningkatkan kinerja kelelahan dan ketahanan terhadap retak termal aspal dasar. Sebaliknya, kedua aditif WMA memiliki efek yang merugikan pada ketahanan rutting dan kelelahan pengikat CRMA tetapi memiliki efek yang berbeda pada kinerja suhu rendah.
- Energi kegagalan yang didefinisikan sebagai area di bawah kurva tegangan-regangan uji LAS hingga titik kegagalan memiliki korelasi yang kuat dengan umur kelelahan yang diprediksi dari pengikat dari analisis S-VECD yang ketat. Oleh karena itu, energi kegagalan berbasis uji LAS dapat dianggap sebagai indikator yang sederhana dan dapat diandalkan untuk menentukan peringkat kinerja fatik dari binder yang berbeda.
- Melalui studi pendahuluan ini, layak dan menjanjikan untuk menggunakan metodologi uji DSR terpadu untuk mengkarakterisasi kinerja pengikat yang mencakup seluruh layanan kisaran suhu.

Sifat penuaan dari pengikat aspal karet dengan aditif WMA harus diinvestigasi. Lebih banyak pengujian verifikasi pada tingkat pengikat dan tingkat campuran perlu dilakukan untuk menetapkan metodologi pengujian DSR terpadu untuk pengujian kinerja pengikat.

5. Daftar Pustaka

- [1] M. A. Yousif, H. H. Zghair, and F. Alsaedi, "Optimal design of mechanical performances of asphalt mixtures comprising nano-clay additives," *Open Engineering*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.1515/eng-2022-0586.
- [2] H. Ding and X. Geng, "Strength and Durability Performance of Sandy Loam Reinforced with Xanthan Gum and Biochar," *Journal of Materials in Civil*

Engineering, vol. 37, no. 2, 2025, doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-18508.

[3] X. Dong, X. Tan, X. Lin, and S. Liu, “Reliability analysis of two adjacent piles in spatially variable unsaturated expansive soil,” *Ocean Engineering*, vol. 319, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120227.

[4] N. Haidar Hari, F. P. Eka Putra, U. Hasanah, S. R. Sutarsih, and Riyan, “Transformasi Jaringan Telekomunikasi dengan Teknologi 5G: Tantangan, Potensi, dan Implikasi,” *Jurnal Informasi dan Teknologi*, pp. 146–150, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.357.

[5] K. Tang, J. Qiu, J. Lai, F. Xue, Z. Wang, and X. Li, “Experimental investigation on deformation-failure mechanisms of a shallow-bias large-section loess tunnel induced by rainfall,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 157, 2025, doi: 10.1016/j.tust.2024.106253.

[6] P. R. Rangan and M. Tumpu, “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*, vol. 17, no. 18, pp. 1666–1673, 2022, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85164822335&partnerID=40&md5=be3e30b342e9367efe6e56f33470cddc>

[7] Hamkah, H. Halim, D. Mairuhu, Hasriana, Aisyah, and Z. Saing, “Effect of the Portland Composite Cement Addition on the Marshall Characteristics of the Cold Paving Hot Mix Asbuton,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, no. 3, pp. 1611–1620, 2024, doi: 10.13189/cea.2024.120326.

[8] S. I. Oleiwi and A. K. Albayati, “Effects of utilizing Crumb Rubber as Aggregate in Asphalt Mixtures,” *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 14, no. 4, pp. 15888–15898, 2024, doi: 10.48084/etasr.7927.

[9] R. Ramadhani, J. Arliansyah, and E. Kadarsa, “The effect of pre-vulcanized latex usage on Marshall characteristics and stiffness modulus in hot mix asphalt wearing course (AC-WC) mixtures,” *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, vol. 33, no. 2, pp. 185–204, 2024, doi: 10.22630/srees.6382.

[10] A. T. Le, V. P. Le, and M. T. Nguyen, “Optimization of SFCC as Mineral Filler in Asphalt–Concrete Mixture Using Combined Methods of Taguchi and PCA,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, no. 7, 2022, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004282.

[11] F. S. Hassan and M. Q. Ismael, “Enhancement of the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures Modified by Nano Clay and Crumb Rubber,” *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 14, no. 5, pp. 17438–17444, 2024, doi: 10.48084/etasr.8531.

[12] S. Safiuddin and F. P. E. Putra, “Strategi Efisiensi Wireless Sensor Network (WSN),” *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL : Journal of Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 52, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2441.

[13] D. Zhu, X. Guo, B. Tang, J. Hu, X. Zou, and Y. Kang, “Feedforward Frequency Deviation Control in PLL for Fast Inertial Response of DFIG-Based Wind Turbines,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 39, no. 1, pp. 664–676, 2024, doi: 10.1109/TPEL.2023.3319134.

[14] G. Cantisani *et al.*, “Re-design of a road node with 7D BIM: Geometrical, environmental and microsimulation approaches to implement a benefit-cost analysis between alternatives,” *Autom Constr*, vol. 135, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104133.

[15] K. Yan, G. Li, R. Zhang, Y. Xu, T. Jiang, and X. Li, “Frequency Control and Optimal Operation of Low-Inertia Power Systems with HVDC and Renewable Energy: A Review,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 4279–4295, 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3288086.

[16] S. Oshnoei, M. R. Aghamohammadi, S. Oshnoei, S. Sahoo, A. Fathollahi, and M. H. Khooban, “A novel virtual inertia control strategy for frequency regulation of islanded microgrid using two-layer multiple model predictive control,” *Appl Energy*, vol. 343, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121233.

[17] S. Sahoo and P. Timmann, “Energy Storage Technologies for Modern Power Systems: A Detailed Analysis of Functionalities, Potentials, and Impacts,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49689–49729, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274504.

[18] C. W. Zhang, “The active rotary inertia driver system for flutter vibration control of bridges and various promising applications,” *Sci China Technol Sci*, vol. 66, no. 2, pp. 390–405, 2023, doi: 10.1007/s11431-022-2228-0.

[19] K. Shen and H. Wang, “Impact of Wide-Base Tire on Flexible Pavement Responses: Coupling Effects of Multi-axle and Dynamic Loading,” *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, vol. 151, no. 1, 2025, doi: 10.1061/JPEODX.PVENG-1558.

[20] A. Nazir, M. C. Liao, Y. W. Zhu, and U. Nazir, “Design and Evaluation of Asphalt Concrete Incorporating Plastic Aggregates Fabricated Using 3D Printing Technology,” *3D Print Addit Manuf*, vol. 9, no. 3, pp. 212–222, 2022, doi: 10.1089/3dp.2020.0347.

[21] N. Albayati and M. Q. Ismael, “Effect of carbon fibers (length, dosage) on the Marshall and volumetric properties of HMA mixtures,” *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias*, vol. 11, no. 3, pp. 71–80, 2023, doi: 10.15649/2346030X.3243.

[22] D. Mabui, M. Tumpu, S. Widodo, M. Rusmin, P. R. Rangan, and Mansyur, “Optimization of Asphalt Content Through Marshall Characteristics Using Modified Asbuton,” *International Journal of GEOMATE*, vol. 26, no. 117, pp. 116–123, 2024, doi: 10.21660/2024.117.4133.

[23] M. Z. Arifin, I. F. Senin, H. Bowoputro, D. M. H. Kore, I. S. Ingsih, and F. F. B. Putri, “the Effect of Polyethylene Terephthalate (Pet) Plastic Addition To Ac-Wc in a Wet Mixture on Increase of Asphalt Stability,” *EUREKA, Physics and Engineering*, vol. 2024, no. 2, pp. 21–33, 2024, doi: 10.21303/2461-4262.2024.003328.

[24] G. Sugiyanto, W. Widarini, and E. W. Indriyati, “the Effect of Sea Water Immersion on Buton Asphalt (As-Buton) Mixture,” *J Teknol*, vol. 84, no. 1, pp. 29–39, 2022, doi: 10.11113/jurnalteknologi.v84.16802.

[25] L. Djakfar, R. Kusumaningrum, T. A. Kusuma, and A. H. Rahman, “The Effect of Sugar Palm Fiber Content on the Marshall Performance of Hot Mix Buton-Asphalt Mixture,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 11, no. 5, pp. 3242–3248, 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110833.

[26] N. Saboo, D. Mehta, A. Sharma, and R. Kumar, “Development of aggregate gradation based on asphalt film thickness and aggregate structure,” *Constr Build Mater*, vol. 440, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137424.

[27] Hamkah, Z. Saing, D. Mairuhu, and M. Tumpu, “Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course

- Mix Incorporating Recycled Tire Rubber As an Additive,” *International Journal of GEOMATE*, vol. 26, no. 115, pp. 34–43, 2024, doi: 10.21660/2024.115.4195.
- [28] E. N. Jasim and H. H. Joni, “Assessment of potential resistance to moisture damage and fatigue cracks of asphalt mixture modified with ground granulated blast furnace slag,” *Open Engineering*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.1515/eng-2022-0551.
- [29] A. Boarie, M. Abdelsalam, A. Gamal, and M. Rabah, “Laboratory and Environmental Assessment of Asphalt Mixture Modified with a Compound of Reclaimed Asphalt Pavement and Waste Polyethylene,” *Buildings*, vol. 14, no. 5, 2024, doi: 10.3390/buildings14051186.
- [30] M. A. Al-Mohammed and A. I. Al-Hadidy, “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*, vol. 36, no. 6, 2024, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-17369.
- [31] I. D. M. A. Karyawan, R. Yuniarti, D. Widianty, Hasyim, and M. Wahyudi, “Impact Curing Time and Compaction Methods to the Performance of Hot Mix Asphalt Asbuton,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 10, no. 5, pp. 2054–2064, 2022, doi: 10.13189/cea.2022.100526.
- [32] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, “Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan,” *INFORMATICS FOR EDUCATORS AND PROFESSIONAL : Journal of Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [33] P. G. dos S. Pereira, R. Q. Coutinho, D. P. de Souza Neto, and I. F. Gomes, “Stability Analysis of an Urban Slope Under Human Activities and Critical Rainfall: Case Study of Recife, Brazil,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 43, no. 2, 2025, doi: 10.1007/s10706-024-03011-z.
- [34] K. Konieczna *et al.*, “Discussion on the bitumen fatigue parameters interpretation for Linear Amplitude Sweep and time-sweep tests: Insights from ageing,” *Constr Build Mater*, vol. 463, 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.139941.
- [35] J. J. García Mainieri and I. L. Al-Qadi, “Designing Stone-Matrix Asphalt to Optimize Sustainability Using Limestone, Dolomite, and Crushed Gravel Aggregates,” *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, vol. 151, no. 1, 2025, doi: 10.1061/JPEODX.PVENG-1614.

Halaman ini sengaja dikosongkan