

INVESTIGASI EKSPERIMENTAL TERHADAP SIFAT MEKANIS CAMPURAN ASPAL MODIFIKASI POLIMER ETILEN-VINIL ASETAT DENGAN METODE CAMPURAN KERING (EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF DRY- BLENDED ETHYLENE-VINYL ACETATE POLYMER-MODIFIED ASPHALT MIX)

Christian Gerald Daniel ^{1), *)}, Jack Widjajakusuma ¹⁾, Valencio Stephen Widjaya ¹⁾, Edricnes ¹⁾,
Clairine Saputan ¹⁾

¹⁾Departemen Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Tangerang, Indonesia

^{*)} e-mail: christian.geralddaniel@gmail.com

Diterima: 23 November 2023 ; direvisi: 11 Desember 2023; disetujui: 18 Desember 2023.

ABSTRAK

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak modifikasi polimer Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) dalam metode campuran kering terhadap sifat-sifat komponen aspal dan campuran beton aspal. Gambar hasil uji SEM dan FTIR menunjukkan pemisahan antara polimer dan bitumen. Fraksi VA (band 1600-2000 dan 1080) memengaruhi komposisi kimiawi bitumen dan menghasilkan sifat yang cenderung ke arah elastis dengan sedikit perubahan pada kekakuannya berdasarkan uji DSR. Rongga udara pada campuran aspal juga berkurang. Kekakuan campuran, terlihat dari nilai modulus elastisitas dan Marshall Quotient (MQ) meningkat hingga 20% dan 50%, stabilitas Marshall meningkat sebesar 40%, kuat tarik sampel aspal mastik dan campuran beton aspal meningkat hingga 600% dan 83.1% pada kecepatan pembebanan kecil, serta 50% dan 70% pada kecepatan beban besar. Hal ini mengindikasikan material campuran yang lebih kaku dan kuat, terutama pada skala mastik, dengan campuran aspal dengan kadar EVA 5% memberikan hasil terbaik. Energi fraktur menunjukkan hasil beragam dengan nilai terbaik dicapai pada kadar EVA 5% untuk skala aspal mastik dan 4% EVA untuk skala campuran beton aspal. Kadar polimer 5% disarankan untuk menghasilkan campuran aspal yang kaku dan berkekuatan tinggi.

Kata Kunci: beton aspal, bitumen, aspal modifikasi polimer, etilen-vinil asetat, metode pencampuran kering

ABSTRACT

This study aims to evaluate the impact of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) polymer modification in the dry mix method on the properties of asphalt components and asphalt-concrete mixtures. SEM and FTIR test images show the separation between polymer and bitumen. The VA fraction (carbonyl ring of bands 1600-2000 and 1080) affects the chemical composition of bitumen and produces properties that tend towards elasticity with little change in stiffness based on the DSR test. Air voids in the asphalt mixture were also reduced. Mixture stiffness, as seen from the modulus of elasticity and Marshall Quotient (MQ) values, increased by 20% and 50%, Marshall stability increased by 40%, tensile strength of mastic asphalt samples and asphalt concrete mixtures increased by up to 600% and 83.1% at low loading speeds, respectively, as well as 50% and 70% at high load speeds. This indicates that the mixed material is stiffer and stronger, especially on the mastic scale, where an asphalt mixture with an EVA content of 5% gives the best results. Fracture energy showed varying results, with the best value achieved at 5% EVA content for the asphalt mastic scale and 4% EVA for the asphalt concrete mix scale. A polymer content of 5% is recommended to produce a stiff, high-strength asphalt mixture.

Key words: asphalt concrete, bitumen, dry mix method, ethylene-vinyl acetate, polymer-modified asphalt

PENDAHULUAN

Struktur perkerasan aspal yang kuat dan tahan lama diperlukan untuk memperpanjang usia layanan jalan dan mengantisipasi volume beban lalu lintas yang terus bertambah secara eksponensial dari waktu ke waktu, dengan modifikasi yang semakin beragam dengan berbagai bahan tambah atau aditif. Salah satu modifikasi yang saat ini banyak diusulkan adalah penambahan bahan polimer ke dalam campuran beton aspal (*Asphalt Concrete* - AC). Polimer sintesis sebagian besar berasal dari produk minyak bumi, yang memberikan rantai karbon panjang sebagai struktur molekul utama. Klasifikasi polimer sintesis biasanya dibagi menjadi tiga kategori: elastomer, termoplastik, dan termoset. Salah satu jenis polimer yang lazim diproduksi massal saat ini adalah etilen-vinil asetat (EVA) (Polymer Database 2021). EVA dibuat sebagai upaya untuk memodifikasi sifat-sifat termoplastik etilena densitas rendah dengan sifat kenyal dari vinil asetat (VA) melalui proses polimerisasi dengan peroksida yang dilakukan pada tekanan tinggi (>100 MPa) dan suhu tinggi (150 - 250°C), dengan kandungan VA berkisar antara 6% hingga 50% berat (Sisanth et al. 2017). Sifat-sifat EVA terutama dipengaruhi oleh kandungan VA. Ketika kandungan VA meningkat, titik leleh polimer menurun karena semakin bergeser ke keadaan elastomer. Sebaliknya, peningkatan kandungan etilena dalam sistem kopolimer akan meningkatkan karakteristik termoplastiknya. Namun, EVA dikenal terutama karena ketahanannya yang sangat baik terhadap reaksi kimia (terutama dengan oksigen, ozon, dan cahaya), kekakuan dan kekuatan lentur yang tinggi, ketangguhan, dan stabilitas termal (Patel et al. 2013; Sasikala and Kala 2018; Thi and Pham 2021). Selain itu, bahan ini juga tidak berbau dalam kapasitas termalnya (Wypych 2017).

Dalam industri rekayasa perkerasan jalan, polimer dapat digunakan untuk memodifikasi perilaku bitumen atau sebagai komponen tambahan pada campuran aspal. Metode pencampuran polimer dapat dilakukan dengan menginjeksikannya terlebih dahulu ke dalam bitumen panas yang masih baru; atau dengan menuangkannya secara bersamaan dengan semua komponen pencampuran. Kedua

metode ini disebut metode pencampuran basah dan kering. Dengan metode basah, polimer pada dasarnya dicampur ke dalam bitumen untuk memodifikasi sifat reologi bitumen, dan hasilnya dikenal dengan nama bitumen termodifikasi polimer (*polymer modified bitumen* - PMB). Sebagai contoh, fase elastomer dari SBS yang dicampurkan dengan metode basah akan menyerap fraksi maltena dari aspal dan membengkak untuk mengembangkan rantai jaringan dan ikatan silang di dalam PMB. Terbukti, penambahan SBS dengan kadar reguler 5-10% dari berat bitumen akan meningkatkan karakteristik bahan bitumen yang mengalami proses penuaan dan meningkatkan sifat *elastic recovery* (McNally and Pötschke 2011). Namun, kompatibilitas antara polimer dan bitumen tetap menjadi perhatian utama hingga saat ini.

Di sisi lain, teknik pencampuran secara simultan umumnya dikenal sebagai metode campuran kering. Metode ini meniadakan kebutuhan wadah penyimpanan khusus untuk bitumen termodifikasi, yang berarti adanya penyederhanaan proses produksi. Polimer diharapkan berperilaku serupa dengan produk serat dalam campuran, yang memiliki fungsi utama untuk memberikan ikatan mekanis dan perkuatan dalam campuran aspal. Mekanisme ini dapat dijelaskan secara memadai oleh jaringan tiga dimensi yang dibentuk serat di dalam spesimen untuk meningkatkan kekuatannya. Selain itu, efek lain dari aplikasi serat ke dalam campuran aspal dalam bentuk energi fraktur yang diperkuat dan umur kelelahan (*fatigue*) juga dijelaskan di dalamnya. Menariknya, dampak positif terhadap umur kelelahan hanya terjadi sampai kadar tertentu, setelah itu efeknya tidak lagi menguntungkan. Hal ini mungkin terjadi karena serat dapat mengganggu mekanisme transfer beban pada mastik alih-alih menjalankan fungsi utamanya (Apostolidis et al. 2020; Daniel et al. 2021; Daniel et al. 2019). Saat ini, beberapa penelitian untuk mengevaluasi efek EVA berbentuk butiran pada campuran aspal dilakukan melalui hasil kuat tarik yang sebanding dengan campuran beton aspal dengan produk bitumen termodifikasi polimer (PMB) dengan kekakuan yang relatif lebih tinggi (Montanelli and srl 2013; C.G. Dan

iel et al. 2022).

Studi ini menyelidiki perilaku campuran beton aspal yang dicampur EVA sebagai bahan pengubah dengan metode pencampuran kering untuk memberikan pemahaman terperinci tentang bagaimana aplikasi tersebut dapat memengaruhi sifat-sifat campuran beton aspal.

HIPOTESIS

Hipotesis dari studi ini adalah bahwa penggunaan polimer EVA untuk campuran aspal dapat memengaruhi komposisi bitumen sebagai bahan perekat akibat reaksi yang ditimbulkan pada saat pencampuran walaupun dengan metode pencampuran kering (*dry mix*), serta dapat meningkatkan kinerja dari campuran aspal yang dimodifikasi.

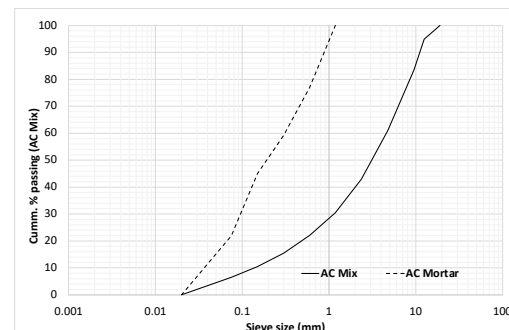
METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bitumen pen 60/70 sebagai bahan bitumen untuk pasir alam dan bahan pengisi (*filler*) yang diperoleh dari gunung setempat sebagai sumbernya. Benda uji campuran aspal panas – *Hot Mix Asphalt* (HMA) – dirancang berdasarkan spesifikasi nasional (Bina Marga 2018) bab 6.3 untuk lapis aus beton aspal (AC-WC) dalam Bahasa Indonesia (Dirjen Bina Marga 2018) bab 6.3 untuk lapis aus beton aspal (AC-WC) dalam Bahasa Indonesia, dan sampel aspal mastik yang merupakan campuran antara bitumen dan agregat halus dengan ukuran terbesar hingga lolos saringan no 10 dibuat dengan memodifikasi desain takaran campuran beton aspal. Sifat material setiap komponen dijelaskan pada tabel 1, sedangkan desain campuran untuk semua benda uji disajikan pada Gambar 1.

Tabel 1. Sifat material penyusun campuran beton aspal (AC)

No	Material	Syarat (Bina Marga 2018)
1	Agregat kasar	Berat jenis ≥ 2.5
		Penyerapan (%) ≤ 3.0
2	Agregat halus	Berat jenis ≥ 2.5
		Penyerapan (%) ≤ 3.0
		Kadar lumpur (%) ≤ 5.0
3	Mineral filler	Berat jenis ≥ 2.5

Sumber: (Dirjen Bina Marga 2018)



Gambar 1. Desain campuran spesimen

Polimer yang digunakan dalam metode kering pada penelitian ini adalah etilen-vinil asetat (EVA) dengan kandungan vinil asetat (VA) yang dominan dalam wujud butiran dengan kadar 5% dan 6% dari berat bitumen, yang ditetapkan berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh penulis (Daniel et al. 2022) dengan merek Superplast dari Iterchemica. Spesifikasi lengkap ditunjukkan pada Tabel 2.

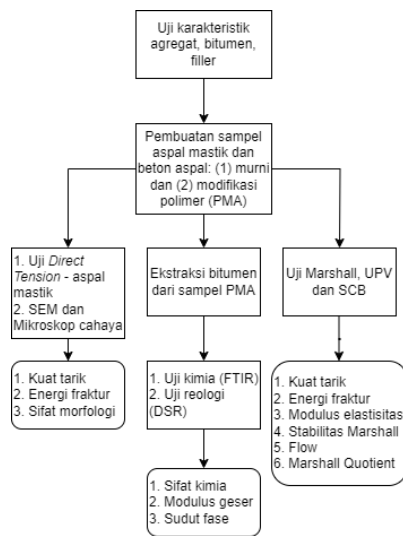
Tabel 2. Sifat-sifat polimer EVA Superplast

Sifat	Nilai	Satuan
Warna	Abu-abu	
Kepadatan	0.4 – 0.6	gr/cm ³
Titik leleh	150	°C

Sumber: (Iterchemica, n.d.)

Pengujian ini dibagi dalam tiga tahap. Pada tahap pertama, sifat kimia dan reologi bitumen yang dimodifikasi akan dievaluasi. Setelah itu, pengujian dilanjutkan pada skala aspal mastik untuk melihat pengaruh

penggunaan EVA pada interaksi antara bitumen dan agregat berukuran halus. Tahap akhir dari penelitian ini adalah mengevaluasi sifat mekanis campuran aspal yang dimodifikasi pada skala yang lebih besar dengan melibatkan agregat kasar melalui beberapa pengujian, yakni *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), Marshall dan *Semi-Circular Bending* (SCB). Urutan langkah kerja lengkap pada riset ini ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

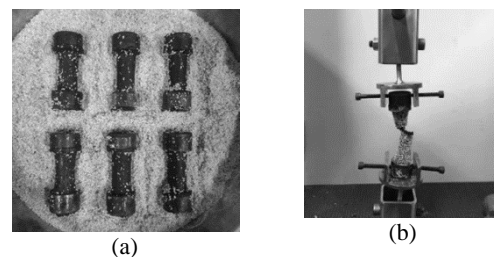
Untuk menyiapkan spesimen HMA, semua komponen dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 160°C selama 45 menit sebelum dimasukkan ke dalam pengaduk dan ditambahkan polimer. Proses pengadukan memakan total waktu ±4 menit. Setelah itu, campuran dimasukkan kembali ke dalam oven untuk menjaga kemudahan pengerjaan karena pencampuran dilakukan pada suhu ruangan. Campuran panas kemudian ditempatkan di dalam cetakan Marshall berdiameter 100 mm pada mesin pemadat Marshall otomatis, di mana benda uji mengalami tumbukan sebanyak 150 kali pada kedua sisinya. Benda uji kemudian dikeluarkan dari cetakan dan didiamkan pada suhu ruangan selama kurang lebih 24 jam sebelum pengujian lebih lanjut.

Sementara itu, produksi sampel aspal mastik untuk uji tarik langsung (*direct tension test* - DTT) serta evaluasi sifat morfologi melalui pengambilan gambar dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) serta mikroskop cahaya mengikuti prosedur yang sama, dengan perbedaan pada tahap pemadatan. Cetakan

silikon berbentuk tulang anjing dibuat untuk pengujian ini dengan menggunakan desain yang berasal dari takaran campuran HMA standar. Campuran mastik dituang ke dalam cetakan, diikuti dengan pemadatan manual menggunakan batangan baja kecil, setelah itu sampel disimpan di dalam pendingin semalaman untuk memastikan sampel dapat dilepaskan dari cetakan tanpa menyebabkan kerusakan yang tidak diinginkan (Gambar 3. **Error! Reference source not found.**a dan b). Uji tarik langsung umumnya menghasilkan kurva tegangan-regangan. Kuat tarik dan energi fraktur dapat ditentukan menggunakan persamaan (1) dan (2), dengan energi fraktur (G_f) didefinisikan sebagai luas kurva tegangan-regangan. Sementara itu, luas penampang (*cross-section area*) didasarkan pada diameter terkecil yang terletak di pusat sampel.

$$\sigma = \frac{F}{\text{cross-section area}} = \frac{F}{0.25\pi d^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$G_f = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \dots\dots\dots (2)$$

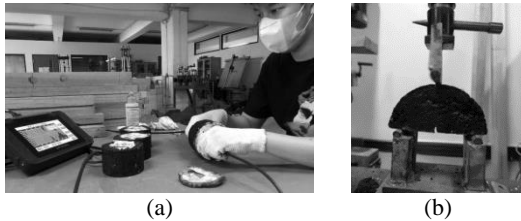


Gambar 3. (a) Fabrikasi dan penyimpanan, dan (b) pengujian benda uji tarik langsung (DTT)

Pengembangan uji DTT uniaksial pada bidang rekayasa aspal sebagai alternatif dari uji tarik tidak langsung (*Indirect Tension Test* – ITT) telah lama dilakukan sejak aplikasi pertamanya, dan terdapat kelemahan pada bentuk benda uji yang menyebabkan kegagalan terjadi di manapun secara acak, bahkan di dekat ujung benda uji, yang berisiko merusak alat uji (Bolzan and Huber 1993). Oleh karena itu, penelitian oleh Erkens dan Poot mengusulkan bentuk benda uji seperti tulang anjing (*dog-bone shape specimen*) untuk menjaga agar retakan hanya menyebar secara lokal di pusat sampel (“Asphalt Concrete Response (ACRe)” 2001), yang kemudian dilanjutkan penelitian lain yang mencoba melakukan simulasi keretakan menggunakan model elemen hingga tiga dimensi (Kringos et al. 2008; Kringos and Scarpas 2008). Sejak saat itu, bentuk ini telah umum digunakan untuk pengujian ini dalam

berbagai kesempatan, seperti untuk mengetahui kapasitas *healing* sampel aspal mastik dengan serat besi (Apostolidis et al. 2016) dan perilaku fraktur pada campuran aspal hangat dengan perkuatan serat.

Adapun untuk pengujian pada skala beton aspal, terdapat beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis spesimen. Salah satunya adalah uji UPV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4a.



Gambar 4. (a) Uji *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan (b) Pengaturan uji *Semi-Circular Bending* (SCB)

Kekakuan campuran PMA diperoleh melalui uji UPV, suatu pemeriksaan nondestruktif yang memberikan hasil yang cukup sederhana dan dapat diterima. Hasil pengujian berupa waktu tempuh gelombang ultrasonik dari satu ujung ke ujung lainnya sesuai yang direkam alat uji, yang terutama bergantung pada kepadatan benda uji. Waktu tempuh dapat dikonversi menjadi modulus elastisitas dinamis dari benda uji campuran beton aspal menggunakan persamaan (3) dan (4).

$$E(P_a) = \frac{V^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + \exp(3.1849 - 0.04233 * \text{Temp } (^{\circ}\text{F}))} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

- V Kecepatan gelombang.
- ν Rasio Poisson.
- Temp Suhu pengujian (dalam Fahrenheit).

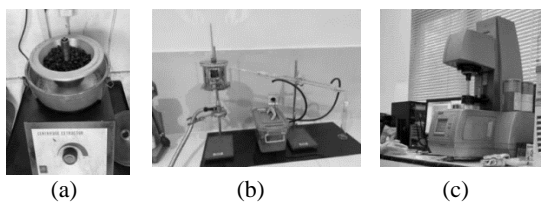
Rasio Poisson dalam persamaan (4) berasal model Witczak dan Mirza untuk campuran aspal panas (*hot mix asphalt* – HMA) dan terbukti akurat (Liu, Zhang, and Liu 2022; Zak et al. 2014). Hasil berupa modulus elastisitas sebanding dengan modulus elastisitas kompleks (E^*) pada frekuensi tertentu, dan penerapan metode uji ini telah dievaluasi dengan hasil yang memuaskan (Tavassoti-Kheiry et al., n.d.).

Selain itu, beberapa benda uji *Semi-Circular Bending* (SCB) yang menggunakan bentuk setengah silinder dengan diameter 150 mm dan *notch* 10 mm pada bentang bawah-tengah dibuat untuk menguji perilaku fraktur HMA termodifikasi polimer dengan berbagai kecepatan pembebanan (2.5, 5, dan 10 mm/menit), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4b. Metode pengujian SCB diadaptasi terutama dari Eurocode NEN-EN 12697-44. Suhu pengujian dijaga pada suhu ruang. Pengaruh berbagai kecepatan pembebanan dapat dikaitkan dengan perilaku mekanis struktur perkerasan beton aspal (yaitu kekakuan dan kapasitas rangkai/*creep*) sebagai akibat dari viskoelastisitas bitumen yang bergantung pada suhu dan frekuensi pembebanan, di mana kecepatan pembebanan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan respons yang lebih kaku dan deformasi yang lebih kecil yang tidak permanen (Gao 2015; Gao, and and Li 2019; Maadani et al., n.d.; Mshali and Steyn 2022). Pengujian ini menghasilkan kuat tarik dan energi fraktur, yang diperoleh dengan menggunakan persamaan (5) dan (6). Diameter dan ketebalan spesimen SCB masing-masing diberi notasi D dan t, sedangkan beban puncak dilambangkan dengan P_{max} , dan usaha akibat fraktur, yang merupakan luas di bawah kurva gaya-perpindahan, dilambangkan dengan W_f .

$$\sigma_{max} (MPa) = \frac{4.263 P_{max}}{D \times t} \dots\dots\dots (5)$$

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} = \frac{W_f}{(0.5D - \text{notch depth}) t} \dots\dots\dots (6)$$

Selain produksi sampel SCB dan Marshall, desain campuran yang sama digunakan untuk membuat campuran aspal untuk kemudian diekstraksi, yang dilakukan terlebih dahulu dalam ekstraktor sentrifugal untuk mengambil bitumen terlarut dan didistilasi untuk mengeluarkan bitumen dari campuran termodifikasi polimer (Gambar 5a dan b). Bitumen yang diekstraksi kemudian melalui evaluasi sifat kimia melalui uji *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan sifat reologinya melalui uji *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) dalam pengaturan *frequency sweep* dengan suhu 20 hingga 50 °C (Gambar 5c).



Gambar 5. (a) Ekstraktor sentrifugal, (b) Peralatan penyulingan bitumen, dan (c) mesin DSR

Uji FTIR digunakan untuk mengamati unsur kimiawi dalam campuran. Material dikenai radiasi inframerah dalam sebuah ruang pada alat uji, dan spektrum respons dicatat dalam bentuk grafik spektra absorpsi. Setiap nilai puncak pada grafik merepresentasikan adanya senyawa atau gugus fungsi yang secara bersama-sama menggambarkan komposisi benda uji. Uji FTIR telah digunakan secara umum untuk menganalisis sifat kimiawi dari campuran bitumen, dimulai dari mengkarakterisasi fraksi senyawa asphaltene dan maltene hingga untuk mengevaluasi efek penuaan dan modifikasi tertentu (Lu et al. 2021; Nivitha, Prasad, and Krishnan 2016; Weigel and Stephan 2017; Yan et al. 2020). Dalam penelitian ini, benda uji aspal mastik termodifikasi dengan tiga kadar polimer (5%, 25%, dan 50% berat bitumen) dibuat dan dianalisis menggunakan metode KBr FTIR.

HASIL DAN ANALISIS

Penentuan Kadar Bitumen Optimal

Penelitian ini diawali dengan tahap persiapan benda uji Marshall untuk menentukan sifat volumetrik benda uji yang digunakan dalam penelitian ini serta untuk menentukan kadar bitumen optimum yang akan digunakan. Pertama, seluruh komponen campuran yang akan digunakan telah melalui pengujian sifat volumetrik sesuai Standar Bina Marga 2018 (Dirjen Bina Marga 2018) dengan hasil pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa seluruh komponen telah sesuai dengan nilai yang tercantum pada standar tersebut. Setelah proses fabrikasi spesimen berdasarkan data awal dan rencana campuran selesai, sampel yang dibuat akan melalui uji sifat volumetrik dan menghasilkan nilai berat isi, rongga udara dalam campuran (void in the mix – VIM), dan rongga udara dalam agregat (void in mineral aggregate – VMA). Hasil pengujian ini dipadukan dengan hasil uji tekan Marshall sehingga kadar bahan

bitumen dapat ditentukan untuk tahap pengujian berikutnya. Hasil uji dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil uji sifat volumetrik komponen campuran aspal

Material	Nilai	
Agregat kasar	Berat jenis	2.559
	Penyerapan (%)	0.739
Agregat halus	Berat jenis	2.508
	Penyerapan (%)	2.836
	Kadar lumpur (%)	1.12
Mineral filler	Berat jenis	2.535

Sumber: Hasil pengujian

Tabel 4. Hasil uji penentuan kadar bitumen optimal

	Kadar Bitumen			Bina Marga 2018
	5.5	6	6.5	
Stabilitas (kg)	688.2	856.5	662.5	≥ 800
Flow (mm)	4.1	2.7	2.8	3 - 5
MQ (kg/mm)	152.6	290.5	225.8	
VIM (%)	13.1	9.6	8.4	3 - 5
Berat jenis	1.9	2.0	2.0	
VMA (%)	30.1	28.1	28.0	

Kadar bahan Bitumen 6% dipilih, dinilai dari hasil uji stabilitas Marshall dan kepadatan tertinggi, dikombinasikan dengan nilai rongga udara yang relatif sedang. Dengan demikian, fabrikasi benda uji untuk pengujian lainnya mengikuti desain campuran ini.

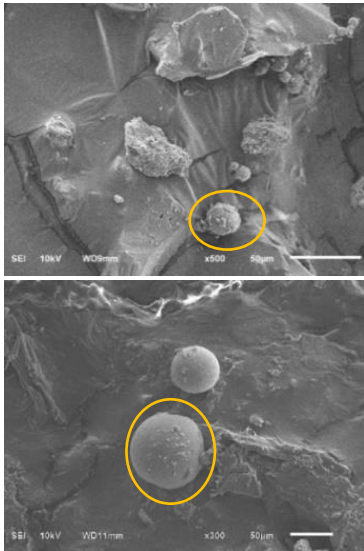
Pemeriksaan Bitumen – Sifat Kimia dan Reologi

Sebelum mengamati perilaku mekanis campuran aspal termodifikasi polimer (*polymer modified asphalt* – PMA), pemeriksaan fisik dilakukan menggunakan dua metode berbeda. Pertama, dilakukan pengambilan gambar permukaan benda uji campuran aspal menggunakan mikroskop cahaya digital. Hasil dapat dilihat dalam Gambar 6.



Gambar 6. Hasil gambar dari mikroskop cahaya digital

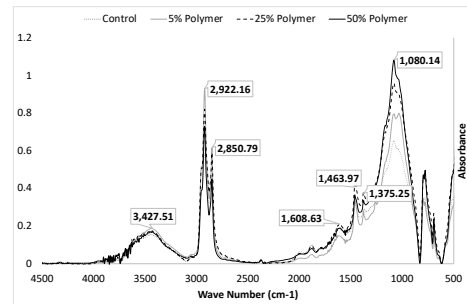
Gambar yang diperoleh dari mikroskop digital tidak dapat menunjukkan dengan jelas seluruh komponen dalam campuran. Namun, terlihat dari permukaan yang tertutup bitumen seluruhnya tanpa bagian yang terkelupas menunjukkan terjadinya pencampuran yang baik. Oleh karena itu, tahap kedua dari bagian ini dilakukan untuk memeriksa karakteristik morfologi benda uji dengan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM). Faktor pembesaran sebesar 300x digunakan untuk menghasilkan gambar yang menunjukkan keberadaan EVA di dalam campuran, seperti terlihat pada Gambar 7.



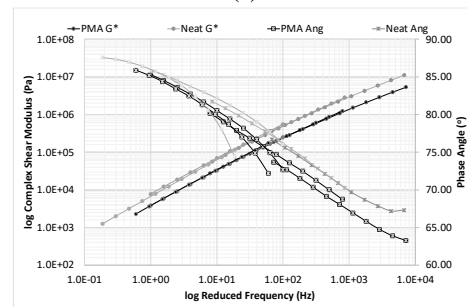
Gambar 7. Hasil gambar SEM dari benda uji aspal termodifikasi polimer

Dalam gambar hasil SEM, terlihat tidak ada deformasi yang jelas pada polimer, yang mengindikasikan bahwa polimer tidak terurai atau mengalami deformasi sepenuhnya ketika membentuk ikatan dengan bitumen ataupun agregat. Perubahan struktur kimiawi bitumen akibat adanya polimer menjadi pertanyaan, sekalipun polimer dituang secara langsung ke dalam campuran aspal, dan bukan dicampur

terlebih dahulu dengan bitumen (*Polymer Modified Bitumen – PMB*). Oleh karena itu, pengujian FTIR dilakukan untuk menganalisis sifat kimia akibat penggunaan EVA tersebut. Hasil uji terdokumentasi dalam Gambar 8a.



(a)



(b)

Gambar 8. (a) Spektra FTIR dan (b) Kurva Master DSR benda uji PMA dengan berbagai kadar polimer vs bahan Bitumen murni (Ref. T = 30°C)

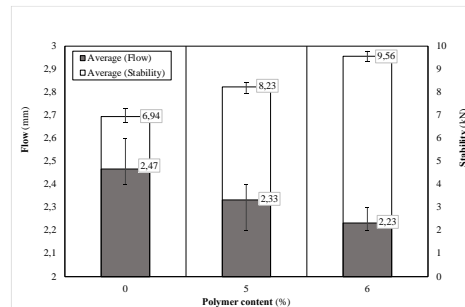
Hasil uji dapat digunakan untuk mengobservasi komposisi kimiawi campuran PMA. Dari hasil uji terlihat jelas bahwa penambahan polimer menyebabkan peningkatan intensitas pada rentang *band* 2800-3000, yang mengindikasikan ikatan *stretching* C-H, dan intensitas sedang pada *band* alkana (1460), dan keduanya memiliki keserupaan dengan gugus etilena, yang dapat menandakan adanya peningkatan konsentrasi senyawa etilena dalam benda uji. Walaupun demikian, perbedaan tersebut terlihat ketika kadar EVA ditingkatkan ke fraksi yang sangat tinggi, yaitu 25% dan 50%. Di sisi lain, sedikit peningkatan cincin karbonil pada kisaran *band* 1600-2000 dan lonjakan pada *band* 1800 menandakan keberadaan gugus ester VA dari polimer. Dengan demikian, pencampuran tersebut menyebabkan terjadinya sedikit modifikasi pada bahan bitumen yang akan memengaruhi sifat reologinya.

Hasil pengujian DSR, seperti disajikan dalam Gambar 8b, menunjukkan perbedaan

sifat reologi bitumen yang diekstrak dari campuran aspal modifikasi polimer dibandingkan dengan bitumen standar PEN 60/70. Hasil pengujian ini mengindikasikan adanya pengaruh penggunaan polimer terhadap sifat kekakuan bitumen hasil ekstraksi, dengan sudut fase yang lebih rendah mengisyaratkan fase bitumen yang lebih mengarah ke elastik dibandingkan dengan sifat bitumen PEN 60/70 yang lebih dominan ke arah viskos pada suhu dan frekuensi beban pengujian. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya reaksi dengan senyawa VA, yang memberikan sifat elastis pada polimer serta memiliki rantai molekul yang relatif mudah putus pada suhu tinggi, seperti yang terindikasi pada bitumen dari hasil uji FTIR.

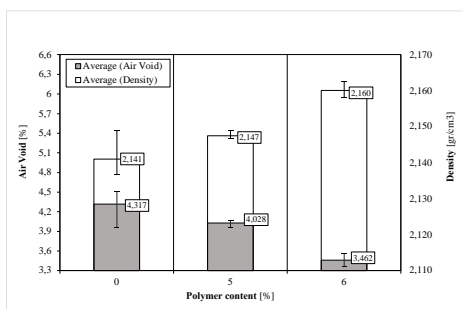
Evaluasi Kekakuan dan Sifat Marshall Spesimen PMA

Selanjutnya, uji tekan Marshall diaplikasikan pada benda uji yang identik. Hasil uji yang diperoleh berupa nilai stabilitas Marshall atau kuat tarik benda uji, *flow* atau deformasi, dan *Marshall Quotient* (MQ), yang didefinisikan sebagai rasio antara stabilitas dan *flow*. MQ juga secara umum digunakan untuk merepresentasikan kekakuan sampel; sehingga korelasi antara nilai MQ dengan hasil uji UPV dapat diperoleh. Gambar 9 menunjukkan perbandingan nilai ini.

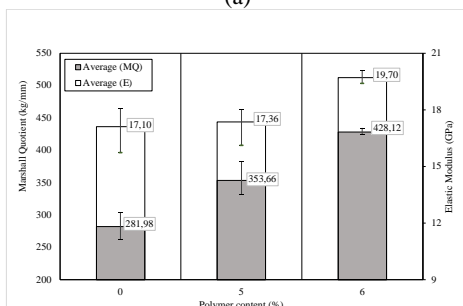


Gambar 9. (a) Rongga Udara dan Kepadatan benda uji UPV/Marshall, (b) Modulus Elastisitas dan Marshall Quotient (MQ), dan (c) Stabilitas Marshall dan Flow benda uji campuran beton aspal dengan berbagai kadar polimer

Penambahan polimer dapat mengurangi rongga udara dalam sampel campuran beton aspal dan meningkatkan kepadatan (Gambar 9a). Hasil uji SEM dan FTIR mengindikasikan bahwa polimer dapat membentuk matriks fisik dan kimia dengan fase mastik untuk mengisi rongga sehingga mengurangi jumlah rongga udara yang terbentuk. Di samping itu, nilai modulus elastisitas (E) dari pengujian UPV dan nilai MQ mengikuti tren yang sama (Gambar 9b), dengan nilainya berbanding lurus dengan kenaikan kadar polimer. Peningkatan kadar polimer dapat memperkuat terjadinya fenomena ini, sehingga menghasilkan nilai kekakuan dan *Marshall Quotient* yang lebih tinggi. Modulus elastisitas spesimen campuran beton aspal ditemukan meningkat sebesar 7% dan 22%, sedangkan nilai *Marshall Quotient* meningkat sebesar 25% dan 52%, keduanya berbanding lurus dengan peningkatan kadar polimer. Lebih jauh lagi, Gambar 9c mengindikasikan adanya peningkatan sifat mekanis pada benda uji PMA, dengan selisih 18% pada kadar polimer 5% dan sekitar 38% dalam benda uji dengan kadar polimer 6%, dibandingkan dengan campuran kontrol. Nilai stabilitas sampel modifikasi berada di atas nilai minimum pada standar Bina Marga 2018 untuk AC-WC, yakni 800 kg atau 8 kN. Sebaliknya, nilai *flow* dari benda uji termodifikasi menunjukkan penurunan kapasitas deformasi secara proporsional terhadap peningkatan kadar polimer, dengan penurunan maksimum sebesar 10% terhadap campuran kontrol. Hasil pada parameter ini juga masih berada pada rentang nilai sesuai dengan standar Bina Marga sebesar 2 – 4mm.



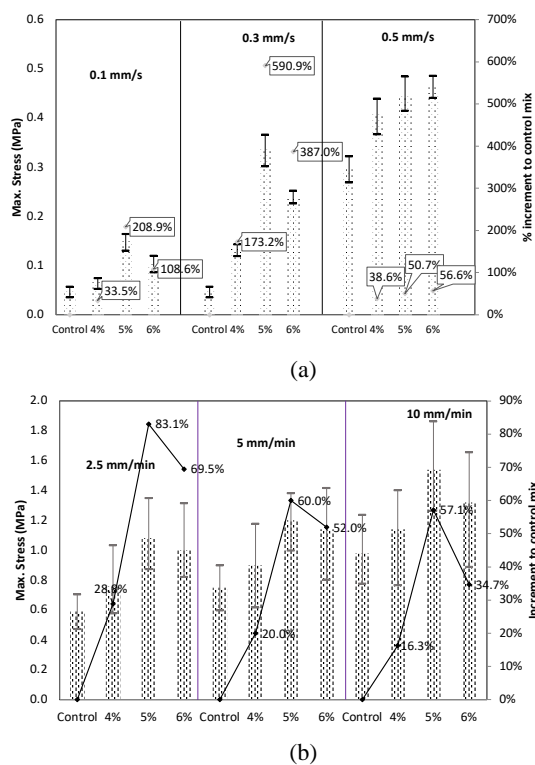
(a)



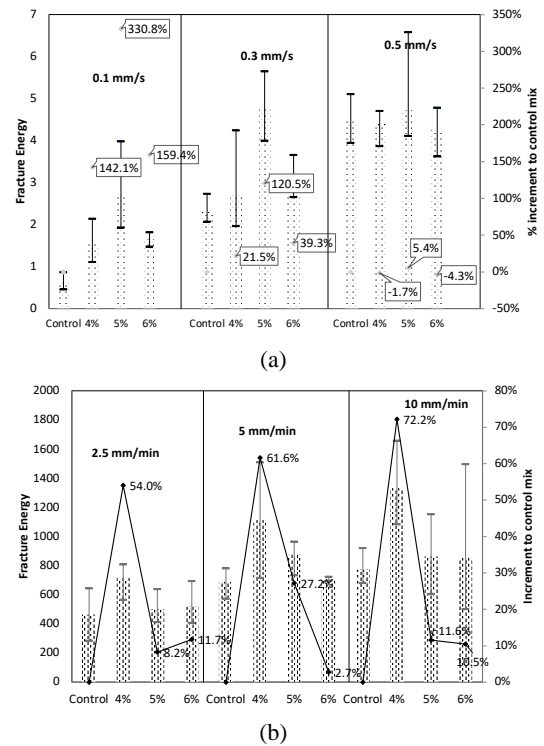
(b)

Pengaruh Variasi Kecepatan Pembebanan Terhadap Sifat Mekanis – Uji Tarik Langsung dan Uji Semi-Circular Bending

Tahap selanjutnya dalam penelitian ini adalah mencoba untuk mengaplikasikan berbagai kecepatan pembebanan untuk menguji respon fraktur aspal mastik dan campuran beton aspal yang dilengkapi dengan EVA. Uji Tarik langsung (*Direct Tension Test – DTT*) dan uji *Semi-Circular Bending (SCB)* dipilih sebagai sarana uji untuk skala mastik maupun skala campuran. Hasilnya digambarkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Kuat tarik (a) Aspal mastik, dan (b) Beton aspal termodifikasi dengan berbagai kadar polimer



Gambar 11. Energi fraktur (a) Aspal mastik, dan (b) Beton aspal termodifikasi dengan berbagai kadar polimer

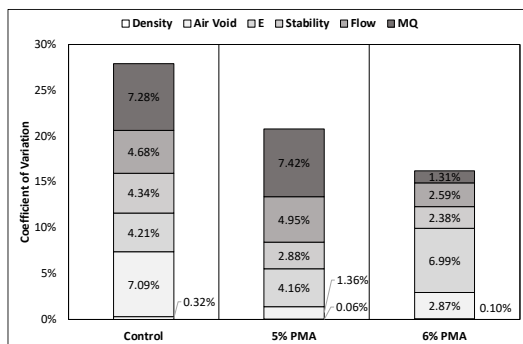
Penggunaan EVA pada spesimen aspal mastik melalui metode pencampuran langsung secara signifikan telah meningkatkan kuat tarik spesimen aspal mastik. Fenomena ini terlihat jelas pada kecepatan pembebanan rendah 0.1 mm/s, di mana kekuatan maksimum campuran mastik PMA 200% lebih tinggi daripada campuran kontrol dan menjadi lebih menonjol pada tingkat kecepatan pembebanan menengah, dengan perbedaan hampir 600%. Sebaliknya, selisih pada tingkat kecepatan beban 0.5 mm/s hanya sekitar 50% (Gambar 10a). Selain itu, polimer menambah kekuatan benda uji SCB campuran beton aspal sekitar 60% dibandingkan dengan campuran kontrol pada kecepatan pembebanan tinggi dan hampir 90% pada kecepatan pembebanan rendah (Gambar 10b).

Selain itu, energi fraktur menggambarkan pengaruh polimer terhadap kekuatan dan kapasitas deformasi dari mastik aspal (Gambar 11a) dan juga sampel campuran beton aspal (Gambar 11b). Dapat dilihat dari selisih antara sampel mastik yang ditambahkan dengan 5% polimer dan campuran kontrol mencapai lebih dari 300% pada tingkat

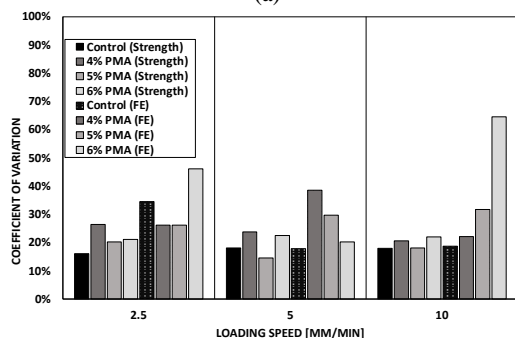
kecepatan pembebanan terendah dan menyusut menjadi sekitar 100% dan kurang dari 10% pada tingkat kecepatan pembebanan menengah dan tinggi. Sementara itu, peningkatan kadar polimer hingga 6% menyebabkan peningkatan kekakuan matriks akibat interaksinya dengan fraksi etilena sehingga mengurangi kapasitas deformasi dan memengaruhi energi fraktur total. Juga dapat dilihat bahwa kadar 4% memberikan energi fraktur tertinggi untuk alasan yang sama. Pada skala yang lebih besar, interaksi antara polimer dan bagian mastik termodifikasi tidak memengaruhi energi faktor secara signifikan pada berbagai tingkat kecepatan pembebanan. Peningkatan energi fraktur spesimen SCB pada kecepatan pembebanan rendah mencapai 50% dibandingkan dengan campuran kontrol dan 70% pada kecepatan pembebanan tinggi.

Variabilitas Hasil Uji Mekanik

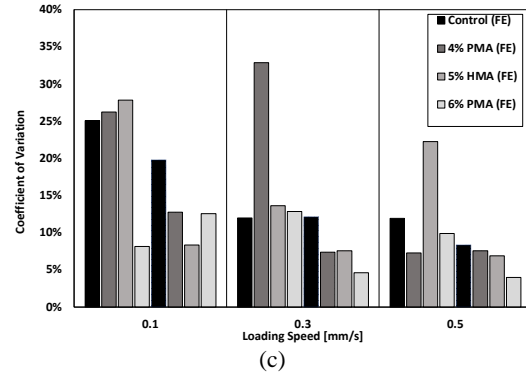
Selain mengamati relevansi antara kadar polimer dan sifat mekanik, variabilitas hasil pengujian dari UPV, Marshall, DTT, dan SCB juga terlihat dari gambar-gambar berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Koefisien variasi pada (a) UPV & Marshall, (b) DTT, dan (c) Uji *Semi-Circular Bending*

Dari Gambar 12a, terlihat jelas bahwa semua sifat volumetrik spesimen tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Akibatnya, variabilitas setiap parameter ditemukan relatif kecil. Walaupun demikian, deviasi rongga udara dapat dikaitkan dengan kekakuan sampel. Selain itu, dari pengamatan SCB (Gambar 12b), terlihat bahwa koefisien variasi untuk PMA 6%, energi fraktur (FE) mencapai puncaknya pada kecepatan pembebanan 0.5 mm/menit dengan nilai lebih besar dari 60%, sedangkan variasi kekuatan hanya mencapai nilai di bawah 50%. Koefisien variasi penambahan polimer 4% dan 5% lebih rendah daripada PMA 6% pada ketiga aspek. Hal yang sama berlaku untuk hasil DTT, di mana koefisien variasi energi fraktur lebih tinggi dibandingkan aspek lainnya (Gambar 12c) pada sebagian besar kecepatan pembebanan dan kadar polimer.

PEMBAHASAN

Hasil pengujian SEM serta FTIR mengindikasikan adanya modifikasi pada bitumen akibat penambahan polimer EVA, walaupun perubahan signifikan baru dapat jelas terlihat pada penggunaan polimer dengan dosis 25%. Hal ini dapat dijadikan sebagai kesimpulan bahwa penggunaan polimer tetap dapat memengaruhi komposisi bitumen sebagai bahan bitumen pada campuran aspal walaupun telah menggunakan metode campuran kering yang tidak menyasar modifikasi bitumen secara khusus. Adapun adanya alterasi pada bitumen ini menyebabkan perubahan pada nilai kekakuan bitumen seperti yang terlihat pada kurva modulus geser kompleks dan sudut fase

hasil pengujian DSR. Terlihat walaupun adanya penurunan nilai modulus geser kompleks dibandingkan bitume standar, penggunaan EVA dapat menurunkan pula nilai sudut fase. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya reaksi yang terjadi antara bitumen dengan fraksi VA yang lebih bersifat elastomer sehingga menyebabkan bitumen tersebut termodifikasi untuk menghasilkan bitumen dengan sifat elastis yang lebih dominan. Oleh sebab itu, penggunaan EVA pada campuran aspal menggunakan metode pencampuran kering ditemukan menyebabkan modifikasi minor terhadap sifat bitumen dengan mengaktifkan sifat elastis dari ikatan oleh senyawa vinil asetat dengan perubahan kecil pada kekakuannya.

Meskipun telah disebutkan bahwa EVA hanya menyebabkan sedikit modifikasi terhadap kekakuan bahan Bitumen, keberadaan EVA dalam matriks masih mengubah kekakuan campuran melalui komponen etilene yang terikat dalam matriks, seperti ditunjukkan dalam gambar SEM dan terlihat melalui parameter MQ oleh sampel hasil uji Marshall serta modulus elastisitas (E) hasil pengukuran dengan alat UPV. Akan tetapi, peningkatan nilai kekakuan tidak sepenuhnya menunjukkan perbandingan linear dengan variasi kadar polimer. Selain itu, peningkatan kekakuan campuran telah ditemukan berkontribusi pada peningkatan kekuatan. Karena sifat polimer yang dapat mempertahankan integritasnya ketika membentuk ikatan dengan bitumen yang bersifat tidak terlalu kaku pada suhu pengujian, polimer dapat meningkatkan kekuatannya. Dari kedua pengujian ini terlihat bahwa kadar 6% memberikan peningkatan besar dalam kedua aspek, mengindikasikan adanya ketahanan terhadap deformasi yang lebih baik pada suhu kerja yang tinggi.

Peningkatan kekuatan sampel aspal yang dimodifikasi juga terlihat melalui hasil pengujian DTT pada skala mastik dan SCB pada skala campuran. Hanya saja, tingkat kenaikan nilai kuat tarik sebagai pengaruh penambahan polimer tidak merata pada setiap tingkat kecepatan pembebanan. Secara alami, ketika bahan Bitumen bergeser ke keadaan yang lebih kental di bawah kecepatan pembebanan rendah, menyebabkan deformasi permanen, peningkatan kekakuan yang disebabkan oleh polimer menjadi sangat jelas pada tingkat ini. Sebaliknya, mastik memiliki peran penting

pada tingkat kecepatan pembebanan tinggi, karena kegagalan adhesi menjadi sangat penting (Panos Apostolidis et al. 2020). Oleh karena itu, polimer memiliki peran kecil dalam skema ini. Perlu dicatat bahwa hasil ini sedikit bertentangan dengan stabilitas Marshall, di mana kandungan polimer yang lebih banyak tidak selalu berhubungan dengan kekuatan yang lebih tinggi, kecuali pada kasus tingkat kecepatan beban yang tinggi pada benda uji tarik langsung. Hal ini dapat terjadi karena distribusi polimer yang tidak merata di dalam campuran, terutama terjadi penyebaran tidak merata pada lokasi kritis di tengah sampel, yang dapat berpengaruh pada hasil akhir. Penelitian lain telah mendokumentasikan fenomena serupa (Daniel et al. 2019; Daniel et al. 2021). Meskipun demikian, dapat disimpulkan bahwa kadar 5% memberikan nilai yang paling optimal dalam hal kuat tarik.

Parameter terakhir yang menjadi tinjauan pada studi ini adalah energi fraktur. Melihat bahwa besar energi fraktur dapat dipengaruhi oleh kekuatan dan kapasitas deformasi, maka meskipun nilai parameter ini dipengaruhi oleh kekuatan yang berbeda, deviasinya menjadi jauh lebih kecil, mengindikasikan efek dari berbagai kapasitas deformasi pada sampel. Deformasi sangat ditentukan oleh kapasitas pemulihan elastisitas bitumen pada kecepatan pembebanan rendah, di mana senyawa VA dapat meningkatkan sifat yang menyebabkan peningkatan energi fraktur yang tinggi.

Hasil analisis tingkat variasi setiap parameter menunjukkan adanya variasi yang lebih besar pada kapasitas deformasi dibandingkan dengan kekuatan dan kekakuan sampel. Tingkat variabilitas ini dapat disebabkan oleh adanya rongga udara dan homogenitas campuran secara keseluruhan, karena menambahkan lebih banyak polimer pada campuran aspal akan meningkatkan kekakuan, dan tidak dipungkiri lagi, masalah kemudahan pengerjaan juga dapat muncul.

Dengan demikian, penambahan EVA ke dalam campuran beton aspal dengan metode pencampuran kering mengaktifkan dua mekanisme; dengan mengubah komposisi kimiawi bitumen terutama oleh senyawa vinil asetat, yang memengaruhi sifat elastisitas bahan bitumen, dan dengan meningkatkan kekakuan campuran melalui interaksi antara mastik dan komponen etilene dari polimer. Hal ini

menghasilkan peningkatan kekuatan dan energi fraktur, terutama terlihat pada tingkat kecepatan pembebanan rendah. Efek samping yang timbul adalah berkurangnya kapasitas deformasi, yang juga dapat diartikan sebagai ketahanan yang lebih tinggi terhadap deformasi permanen. Selain itu, variasi setiap nilai hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan deviasi akibat penggunaan polimer dengan kadar yang lebih besar. Dengan demikian, kadar 5% dapat disarankan dalam penggunaan lebih lanjut untuk mencapai hasil yang paling optimal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini telah mencoba untuk mengevaluasi penggunaan termoplastik etilena-
vinil asetat (EVA) dalam campuran aspal termodifikasi polimer (PMA) dengan memeriksa perilakunya dari bitumen ke skala campuran. Pengamatan FTIR dan SEM menyimpulkan bahwa meskipun polimer tidak terlarut dalam campuran, fraksi vinil asetat dapat memodifikasi bitumen, dilihat dari band spektra cincin karbonil (1600-2000) dan band 1080, yang mengindikasikan senyawa vinil-asetat pada ekstraksi sampel PMA. Hanya, efek ini baru terlihat signifikan pada kadar polimer yang sangat besar (25-50% dari berat bitumen). Adapun perubahan ini dapat sedikit memengaruhi modulus geser kompleks (G^*) sekaligus memperbesar kecenderungan ke fase elastis. Pemeriksaan dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan uji Marshall menunjukkan bahwa kekakuan campuran meningkat secara proporsional dengan peningkatan kadar polimer dengan selisih 7% dan 22% untuk modulus elastisitas, dan 25% dan 52% untuk MQ, yang dapat dihubungkan dengan kekakuan matriks yang meningkat dalam campuran. Stabilitas Marshall meningkat sebesar 18% dan 38% untuk campuran dengan fraksi polimer masing-masing 5% dan 6% dengan nilai stabilitas yang berada di atas syarat minimum 800 kg / 8 kN. Selain itu, kekuatan tarik spesimen mastik meningkat sebesar 200% dan 600% pada tingkat kecepatan pembebanan rendah dan menengah, sedangkan selisih pada tingkat kecepatan pembebanan tinggi menurun menjadi hanya 50%. Hasil yang serupa juga dilaporkan dari uji SCB, dengan selisih berkisar antara 90% hingga 60% pada tingkat kecepatan

pembebanan rendah dan tinggi. Hasil ini dicapai oleh spesimen PMA dengan kadar 5%. Kapasitas deformasi sampel terlihat pada parameter *flow* yang menurun hingga 10% pada kadar polimer 6% dengan nilai yang berada pada rentang standar Bina Marga antara 2 dan 4 mm. Selain itu, energi fraktur ditemukan sangat bervariasi pada tingkat kecepatan pembebanan rendah dalam skala mastik, di mana kadar polimer 5% menyebabkan deformasi elastis dan sifat kekakuan mastik yang seimbang. Aplikasi EVA sebagai bahan modifikasi aspal dengan metode campuran kering menghasilkan sampel dengan kekakuan tinggi dan meningkatkan kekuatan serta energi fraktur, sehingga tahan terhadap deformasi alur (*rutting*) pada temperatur tinggi. Dosis polimer sebesar 5% berat bitumen disarankan untuk penggunaan yang optimal.

Saran

Penelitian pada masa mendatang mengenai topik ini perlu membahas kinerja jangka panjang dari campuran beraspal terhadap pembebanan berulang dan penuaan oksidatif. Selain itu, kerusakan yang disebabkan oleh kelembaban pada campuran beraspal termodifikasi ini perlu diteliti. Terakhir, perubahan perilaku akibat perbedaan metode penggabungan EVA ke dalam campuran beraspal (dari metode campuran kering ke metode campuran basah) harus dikaji untuk mendapatkan pemahaman yang menyeluruh mengenai kedua metode pembuatan campuran aspal termodifikasi polimer.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Pelita Harapan atas kontribusi besarnya dalam mendanai penelitian ini melalui hibah nomor 414/LPPM-UPH/XII/2021. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada PT Enceha Pacific atas kerja samanya dengan Universitas Pelita Harapan dalam mendukung penelitian ini dengan menyediakan produk polimer, Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan akses untuk melakukan uji FTIR, dan PT Buntara Megah Inti yang telah menyediakan fasilitas untuk uji DSR.

DAFTAR PUSTAKA

- Apostolidis, P., X. Liu, A. Scarpas, C. Kasbergen, and M. F.C. van de Ven. 2016. "Advanced Evaluation of Asphalt Mortar for Induction Healing Purposes." *Construction and Building Materials* 126 (November): 9–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.011>.
- Apostolidis, Panos, Xueyan Liu, C.G. Daniel, Sandra Erkens, and Tom Scarpas. 2020. "Effect of Synthetic Fibres on Fracture Performance of Asphalt Mortar." *Road Materials and Pavement Design* 21 (7): 1918–31. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1574235>.
- "Asphalt Concrete Response (ACRe)." 2001.
- Biron, Michel. 2016. "Thermoplastic Specific Properties." In *Material Selection for Thermoplastic Parts*, 39–75. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7020-6284-1.00002-7>.
- Bolzan, Pablo E, and Gerald Huber. 1993. "Direct Tension Test Experiments."
- Daniel, C. G., X. Liu, P. Apostolidis, S. Erkens, and A. Scarpas. 2019. "Impact of Synthetic Fibres on Asphalt Concrete Mix." In *Bituminous Mixtures and Pavements VII- Proceedings of the 7th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, ICONFBMP 2019*, 709–11. CRC Press/Balkema. <https://doi.org/10.1201/9781351063265-96>.
- Daniel, C.G., J. Widjajakusuma, I. Otto, and C. Saputan. 2022. "The Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Synthetic Polymer Modified Hot and Warm Mix Asphalt." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1117 (1): 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012002>.
- Daniel, Christian Gerald, Xueyan Liu, Panos Apostolidis, S.M.J.G. Erkens, and A. Scarpas. 2021. "Low-Temperature Fracture Behaviour of Synthetic Polymer-Fibre Reinforced Warm Mix Asphalt." In *Green and Intelligent Technologies for Sustainable and Smart Asphalt Pavements*, 1st ed., 1:358–62. Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003251125>.
- Dirjen Bina Marga. 2018. "Spesifikasi Umum Bina Marga 2018."
- Gao, Jian Hong. 2015. "The Asphalt Pavement Structure Mechanics Response under the Variable Speed Moving Load."
- Gao, Lian Sheng, Han Cheng Dan, and Liang Li. 2019. "Response Analysis of Asphalt Pavement under Dynamic Loadings: Loading Equivalence." *Mathematical Problems in Engineering* 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7020298>.
- Iterchemica. n.d. "Superplast Polymeric Compound For Bituminous Mixes Modification." www.iterchimica.it.
- Kringos, N., and A. Scarpas. 2008. "Physical and Mechanical Moisture Susceptibility of Asphaltic Mixtures." *International Journal of Solids and Structures* 45 (9): 2671–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.12.017>.
- Kringos, N., A. Scarpas, A. Copeland, and J. Youtcheff. 2008. "Modelling of Combined Physical-Mechanical Moisture-Induced Damage in Asphaltic Mixes Part 2: Moisture Susceptibility Parameters." *International Journal of Pavement Engineering* 9 (2): 129–51. <https://doi.org/10.1080/10298430701792227>.
- Liu, Xu, Mo Zhang, and Wanqiu Liu. 2022. "The Relationship between Poisson's Ratio Index and Deformation Behavior of Asphalt Mixtures Tested through an Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensor." *Materials* 15 (5). <https://doi.org/10.3390/ma15051882>.
- Lu, Xiaohu, Hilde Soenen, Peter Sjövall, and Georgios Pipintakos. 2021. "Analysis of Asphaltenes and Maltenes before and after Long-Term Aging of Bitumen." *Fuel* 304

- (November).
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121426>.
- Maadani, Omran, Civil Engineering, A O Abd, and El Halim. n.d. "Impact of Asphalt Concrete Temperature and Traffic Loading Speed on Structural Behavior of Flexible Pavement."
- Maitz, M.F. 2015. "Applications of Synthetic Polymers in Clinical Medicine." *Biosurface and Biotribology* 1 (3): 161–76. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2015.08.002>.
- McNally, T., and P. Pötschke. 2011. *Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterisation*. Woodhead Pub.
- Montanelli, Eng. Filippo, and Iterchimica srl. 2013. "Fiber/Polymeric Compound for High Modulus Polymer Modified Asphalt (PMA)." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104 (December): 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.096>.
- Mshali, Michael R.S., and Wynand Jvd M. Steyn. 2022. "Effect of Truck Speed on the Response of Flexible Pavement Systems to Traffic Loading." *International Journal of Pavement Engineering* 23 (4): 1213–25. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1797733>.
- Namazi, Hasan. 2017. "Polymers in Our Daily Life." *BioImpacts* 7 (2): 73–74. <https://doi.org/10.15171/bi.2017.09>.
- Nivitha, M. R., Edamana Prasad, and J. M. Krishnan. 2016. "Ageing in Modified Bitumen Using FTIR Spectroscopy." *International Journal of Pavement Engineering* 17 (7): 565–77. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1007230>.
- Njuguna, J, and K Pielichowski. n.d. "The Role of Advanced Polymer Materials in Aerospace," 161. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/257748047_The_Role_of_Advanced_Polymer_Materials_in_Aerospace/citations.
- Pascault, J.-P., and R.J.J. Williams. 2012. "Overview of Thermosets: Structure, Properties and Processing for Advanced Applications." In *Thermosets*, 3–27. Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857097637.1.3>.
- Patel, Mogon, Simon Pitts, Peter Beavis, Mathew Robinson, Paul Morrell, Niaz Khan, Imran Khan, et al. 2013. "Thermal Stability of Poly(Ethylene-Co-Vinyl Acetate) Based Materials." *Polymer Testing* 32 (4): 785–93. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2013.03.014>.
- Polymer Database. 2021. "Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (Eva) - Properties and Applications." Polymer Properties Database. 2021. <https://polymerdatabase.com/PolymerBrands/EVA.html>.
- Polymers Database. 2022. "Elastomers." 2022. <http://polymerdatabase.com/Elastomers/Elastomers.html>.
- "Polymers in Everyday Things Background Information for Teachers." n.d.
- Sasikala, A., and A. Kala. 2018. "Thermal Stability and Mechanical Strength Analysis of EVA and Blend of EVA with Natural Rubber." In *Materials Today: Proceedings*, 5:8862–67. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.318>.
- Shrivastava, Anshuman. 2018. "Introduction to Plastics Engineering." In *Introduction to Plastics Engineering*, 1–16. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-39500-7.00001-0>.
- Sisanth, K. S., M. G. Thomas, J. Abraham, and Sabu Thomas. 2017. "General Introduction to Rubber Compounding." In *Progress in Rubber Nanocomposites*, 1–39. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100409-8.00001-2>.
- Tavassoti-Kheiry, Pezhouhan, M Asce, Ilker Boz, ; Xuan Chen, Mansour Solaimanian, Thomas D Larson, and Ph D Candidate. n.d. "Application of Ultrasonic Pulse Velocity Testing of Asphalt Concrete Mixtures to Improve the Prediction Accuracy of Dynamic Modulus Master Curve."

Thi, Nga, and Hong Pham. 2021. "Characterization of Low-Density Polyethylene and LDPE-Based/Ethylene-Vinyl Acetate with Medium Content of Vinyl Acetate Characterization of Low-Density Polyethylene and LDPE-Based/Ethylene-Vinyl Acetate with Medium Content of Vinyl." <https://doi.org/10.3390/polym>.

Weigel, S., and D. Stephan. 2017. "The Prediction of Bitumen Properties Based on FTIR and Multivariate Analysis Methods." *Fuel* 208: 655–61. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.048>.

Wypych, George. 2017. "ODOR IN RELATION TO DIFFERENT POLYMERS." In *Handbook of Odors in Plastic Materials*, 83–115. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-895198-98-0.50010-0>.

Yan, Yuan, Yanmei Yang, Maoping Ran, Xinglin Zhou, Lanlin Zou, and Minrui Guo. 2020. "Application of Infrared Spectroscopy in Prediction of Asphalt Aging Time History and Fatigue Life." *Coatings* 10 (10): 1–18. <https://doi.org/10.3390/coatings10100959>.

Zak, Josef, Jiri Stastna, Jiri Vavricka, Kristyna Milackova, Lukas Kasek, and Ludo Zanzotto. 2014. "Poisson's Ratio of Hot Asphalt Mixtures Determined by Relaxation and Small Amplitude Oscillation Tests." In , 49–58. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784478462.007>.