

# PERBANDINGAN DAMPAK LINGKUNGAN PRODUKSI SKALA LABORATORIUM CAMPURAN ASPAL MODIFIKASI POLIMER DENGAN METODE CAMPURAN BASAH DAN KERING MENGGUNAKAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)* (*ENVIRONMENTAL IMPACT COMPARISON OF LABORATORY-SCALE PRODUCTION OF POLYMER-MODIFIED ASPHALT WITH DRY AND WET MIXING METHODS USING LIFE CYCLE ASSESSMENT*)

Christian Gerald Daniel<sup>1)</sup>, M. Rifqon<sup>2)</sup>, Fadhil M. Firdaus<sup>3)</sup>, Khairina A. Canny<sup>4)</sup>

<sup>1),2)</sup> Departemen Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan

<sup>3)</sup> Air Quality Research Analyst at World Resources Institute

<sup>4)</sup> Smart Construction and Civil Engineering, Calvin Institute of Technology

<sup>1),2)</sup> MH Thamrin Boulevard 1100, Klp. Dua, Kec. Klp. Dua, Kota Tangerang

<sup>3)</sup> Jakarta, Indonesia

<sup>4)</sup> Jl. Industri Blok B14, RW.10, Pademangan Timur, Jakarta

<sup>1)</sup>christian.geraldaniel@gmail.com, <sup>2)</sup>christian.daniel@uph.edu, <sup>3)</sup>Fadhil.firdaus@wri.org, <sup>4)</sup>khairina.anindya@calvin.ac.id

Diterima: 24 Maret 2023 ; direvisi: 25 Mei 2023; disetujui: 30 Mei 2023;

## ABSTRAK

Kajian ini mengevaluasi dampak lingkungan produksi campuran aspal panas modifikasi polimer melalui dua metode: memodifikasi bitumen (Polymer Modified Bitumen – PMB) serta aplikasi langsung ke campuran atau metode kering (dry mix) menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA) berdasarkan pengukuran emisi di laboratorium untuk produksi 5 sampel per tipe campuran. Polimer yang digunakan untuk metode kering adalah EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) sebanyak 5% - 6% berat bitumen. Ruang lingkup kajian ini adalah dari akuisisi bahan baku hingga produksi skala laboratorium. Pengukuran emisi kegiatan produksi sampel di lab menunjukkan kenaikan emisi CO<sub>2</sub> 21.78 – 38.3%, Volatile Organic Compound (VOC) sebesar 16.69 – 28.93%, serta formaldehida dan partikulat (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>) sebesar 14.6 – 20.17% dan 7 – 37% untuk produksi dengan PMB akibat suhu pemanasan yang lebih tinggi. Perbandingan hasil LCA menunjukkan kategori dampak Global Warming Potential untuk produksi sampel PMB hingga 2.8kg CO<sub>2</sub>-eq / 5 sampel, meningkat 1.1 – 4.1%. Pada kategori Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, dampak penggunaan PMB tercatat sebesar 0.32 kg 1.4-DB eq / 5 sampel, meningkat 9.15 – 12.33%, serta kategori Human Toxicity dan Photochemical Oxidation Potential sebesar 167 kg 1.4-DB eq dan 0.00081 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq / 5 sampel, 14.35 – 25% lebih tinggi dari hasil sampel aspal modifikasi polimer EVA dengan metode kering. Penggunaan EVA menghasilkan sampel dengan Marshall Quotient 67.7% lebih tinggi dan stabilitas 14% lebih rendah dari PMB, dengan sifat volumetrik setara. Disimpulkan bahwa aplikasi polimer dengan metode campuran kering memiliki kualitas setara dengan PMB dan lebih ramah lingkungan.

**Kata Kunci:** life cycle assessment, cradle-to-gate, metode campuran kering, bitumen modifikasi polimer, EVA

## ABSTRACT

This study evaluates the environmental impact of polymer-modified bituminous mix production through wet-mixed polymer-modified bitumen (PMB) and direct, dry mixing technique using the Life Cycle Assessment (LCA) method based on emission monitoring in the lab for 5 samples per each type of mix. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) of 5% and 6% bitumen weight was incorporated for the dry mix. The scope of this study was from raw material acquisition to lab-scale production. Emission monitoring from the sample production stage in the lab showed that producing PMB-based samples increased CO<sub>2</sub> concentration by 21.78 – 38.3%, Volatile Organic Compound by 16.69 – 28.93%, as well as formaldehyde and particulate matter by 14.6 – 20.17% and 7 – 37%, all were due to a higher heating temperature. LCA outcomes showed that the Global Warming Potential impact category of 5 PMB sample production was 2.8kg CO<sub>2</sub>-eq, increasing by 1.1 – 4.1%. The Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential of 5 PMB samples production was 0.32 kg 1.4-DB eq, 9.15 – 12.33% higher than the EVA-modified specimens, and both Human Toxicity and Photochemical Oxidation increased by 14.35 – 25% to 167 kg 1.4-DB eq and 0.00081 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq. The Marshall Quotient and Stability of the EVA-Modified mix were 67.7% higher and 14% lower than the PMB-based specimens with similar volumetric properties, indicating an eco-friendlier solution from the dry-blended polymer-modified asphaltic mixtures approach with similar properties.

**Key words:** life cycle assessment, cradle-to-gate, dry mix method, polymer modified bitumen, EVA

## PENDAHULUAN

Penggunaan polimer pada campuran aspal sudah merupakan aplikasi yang lazim saat ini di Indonesia. Terdapat dua metode yang biasanya digunakan untuk memodifikasi campuran aspal dengan polimer, yaitu dengan cara mencampurkan terlebih dahulu ke bitumen untuk membentuk bitumen modifikasi polimer (*Polymer Modified Bitumen – PMB*) yang dikenal dengan metode campuran basah (*wet mix method*), serta dengan cara mencampurkan polimer secara langsung pada saat proses pencampuran bitumen dan agregat berlangsung yang dikenal dengan metode campuran kering (*dry mix method*) dan menghasilkan produk campuran aspal modifikasi polimer (*Polymer Modified Asphalt – PMA*) (McNally and Pötschke 2011). Kedua metode pencampuran ini juga dibahas pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Seksi 6.5, dalam kasus ini digunakan untuk aplikasi material aspal Buton pada campuran aspal panas.

Polimer yang sering digunakan untuk modifikasi campuran aspal umumnya diklasifikasikan dalam dua kategori, yakni elastomer serta termoplastik. Penggunaan polimer elastomer yang memiliki menghasilkan bitumen yang memiliki nilai *elastic recovery*, fleksibilitas serta *damping energy* yang tinggi, serta datang baik dalam bentuk natural, seperti karet natural yang juga memiliki kuat tarik serta ketahanan terhadap lelah yang tinggi, maupun dari hasil rekayasa seperti karet vulkanisasi yang memiliki kekakuan lebih tinggi dari karet alam serta proses kopolimerisasi dengan contoh *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS) dan *Styrene-Butadiene-Rubber* (SBR) yang memiliki kekakuan yang lebih tinggi dari karet alam tetapi masih memiliki sifat fleksibilitas yang baik, maupun durabilitas dan ketahanan terhadap abrasi yang tinggi (Hakami, Alokesh and Animesh 2022; Hashim and Ong 2016; Sousa 2017).

Polimer yang tergolong dalam kategori termoplastik memiliki kekakuan yang cukup tinggi dibandingkan elastomer akibat kekakuan pada ikatan monomernya sendiri, tetapi dengan tingkat viskositas yang rendah sehingga mudah dibentuk dalam tekanan yang lebih rendah dibandingkan produk termoset. Produk termoplastik seperti PE dan EVA dapat digunakan sebagai bahan modifikasi bitumen

dengan efek peningkatan kekakuan yang menghasilkan ketahanan terhadap deformasi permanen serta keretakan yang tinggi (Silva et al. 2018; Sharma, Sitansh, and Niraj 2019; Desidery, Lanotte, and Devasahayam 2021). Hanya saja, kadar polimer yang digunakan harus diperhatikan, dimana salah satu penelitian menunjukkan adanya perubahan sifat reologi bitumen ke arah gel akibat konsentrasi molekul PE maupun EVA yang tinggi dan menerus, jika ditambahkan dengan kadar lebih dari 6% (Okhotnikova et al. 2019; Nizamuddin, Boom, and Giustozzi 2021).

Selain menjadi bahan modifikasi bitumen, termoplastik umumnya dapat digunakan sebagai bahan tambah pada campuran aspal dengan metode campuran kering (*dry mix*), dimana polimer yang digunakan bisa dalam bentuk cacahan plastik (PE dan PP), dalam bentuk pelet seperti EVA, maupun dalam bentuk fiber seperti aramid atau PET. Penggunaan termoplastik dalam ketiga bentuk ini terbukti meningkatkan kekakuan, kekuatan, serta meningkatkan umur hidup dan ketahanan terhadap deformasi permanen pada campuran aspal dengan penggunaan polimer beragam dari 0.05% hingga 6% dari berat campuran (Suksiripattanapong et al. 2022; Apostolidis et al. 2020; C.G. Daniel et al. 2021; Slebi-Acevedo et al. 2020). Adapun penggunaan EVA dengan metode *dry mix* belum banyak diuji lebih lanjut, dengan penelitian sebelumnya menunjukkan adanya peningkatan akibat penggunaan EVA dengan dosis 5 – 6% dari berat bitumen terhadap kekuatan, energi fraktur, serta modulus kekakuan dan umur hidup campuran aspal (C.G. Daniel et al. 2022; Montanelli and srl 2013).

Selain kajian mengenai sifat mekanis campuran aspal modifikasi polimer dengan metode campuran kering dan basah, studi yang ada juga telah membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan keduanya menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA dapat didefinisikan sebagai suatu metode sistematis untuk menganalisis dan mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk atau suatu proses kerja pada seluruh tahapan daur hidupnya (Klopffer and Grahl 2014). Penggunaan metode analisis LCA untuk penilaian dampak lingkungan akibat penggunaan campuran aspal untuk perkerasan

jalan telah dilakukan sebelumnya. Contoh aplikasinya yakni analisis penggunaan plastik cacahan pada campuran aspal, baik melalui modifikasi bitumen maupun dengan metode *dry mix*, yang telah diketahui menghasilkan campuran aspal yang memiliki sifat mekanis yang meningkat serta dapat didaur ulang untuk penggunaan lebih lanjut, bahkan dengan tingkat emisi *Volatile Organic Compound* (VOC) serta *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAH) yang lebih kecil dibandingkan proses daur ulang dengan aspal standar (Giustozzi et al. 2022a; Giustozzi et al. 2022b). Selain itu, terdapat satu kajian yang membandingkan penggunaan plastik daur ulang untuk modifikasi metode *wet mix* serta *dry mix* dengan hasil dampak *human carcinogenic toxicity* yang lebih rendah oleh penggunaan metode *dry mix* akibat emisi *Particulate Matter* (PM) dan PAH yang lebih kecil (Oreto et al. 2021). Contoh lain adalah evaluasi dampak lingkungan dari penggunaan campuran aspal hangat menggunakan data yang berasal dari Eropa (Araujo, Joao, Gilberto 2022; Vega et al., 2019; Vidal et al., 2013) serta Asia Tengah (Milad et al. 2022), yang mana dibuat berdasarkan data dari *Ecoinvent* serta pengukuran pada lokasi studi tersebut serta menggunakan teknologi aspal daur ulang.

Untuk skala nasional, penggunaan metode LCA dalam analisis dampak lingkungan di Indonesia masih relatif sedikit, dengan beberapa studi eksisting melakukan studi kasus untuk mengukur dampak dari proyek konstruksi jalan serta membandingkan alternatif material beton dan aspal untuk kasus konstruksi jalan di daerah tertentu (Wirahadikusumah and Sahana 2012; Fistcar 2020). Selain itu, terdapat juga studi yang menganalisis dampak penggunaan teknologi aspal daur ulang pada ruas jalan di Propinsi Jawa Barat (Sarasputri 2022). Seluruh kajian tersebut menggunakan metode evaluasi LCA berdasarkan data inventori yang disediakan dari *database* LCA yang ada sebelumnya di aplikasi seperti Simapro dan Open LCA.

Dari penelitian sebelumnya, pengaruh penggunaan polimer EVA melalui metode campuran kering belum diteliti lebih lanjut dan dibandingkan dengan penggunaan PMB yang komersil di Indonesia, serta kajian yang ada belum memperlihatkan secara detail efek dari setiap tahap dalam proses produksi campuran

aspal sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

## HIPOTESIS

Akibat suhu pengerjaan yang lebih rendah, aplikasi polimer pada campuran aspal dengan metode pencampuran kering (*dry mix*) dipandang akan memiliki dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan penggunaan material PMB pada campuran aspal dengan sifat mekanis yang dapat dibandingkan. Penelitian ini mengkaji seberapa jauh dampak lingkungan yang dihasilkan dan seberapa ekuivalen sifat mekanis yang dihasilkan perlu dikuantifikasi lebih lanjut.

## METODOLOGI

### Persiapan dan Produksi Sampel

Sebelum melakukan pemeriksaan dampak lingkungan dan sifat mekanis dari semua sampel aspal, seluruh bahan baku campuran, yaitu agregat dan bitumen perlu melalui pengecekan sifat fisik dan mekanis berdasarkan standar Bina Marga 2018. Bitumen yang digunakan adalah bitumen standar penetrasi 60/70 serta PMB PG-76 dari Shell yang menggunakan modifikasi polimer *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS), sedangkan agregat kasar dan halus yang digunakan diambil dari *quarry* Parung Panjang, seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 (Kiri). Setelah memastikan bahwa seluruh bahan baku campuran memenuhi standar, proses produksi sampel pun dibuat di laboratorium perkerasan jalan di Universitas Pelita Harapan dengan metode produksi mengacu pada Bina Marga 2018 untuk campuran aspal panas yang dimodifikasi polimer *Ethylene-Vinyl Acetate* (EVA) dengan metode pencampuran kering (*dry mix*) maupun yang menggunakan PMB. Semua material campuran aspal dipanaskan pada suhu 160°C selama 45 menit, kemudian semua material dicampur didalam mixer *planetary* untuk menjaga tingkat pencampuran sampel agar dapat merata ketika agregat dicampurkan dengan polimer dan bitumen. Polimer yang digunakan untuk modifikasi campuran HMA dalam penelitian ini berbahan dasar EVA dengan dosis sebesar 5% dan 6% dari berat bitumen. Pemilihan kadar polimer ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang telah dipublikasikan bahwa dosis tersebut

memberikan hasil yang paling optimum dari segi kekuatan dan daya tahan terhadap keretakan (Montanelli and srl 2013; C.G. Daniel et al. 2022). Polimer EVA yang digunakan memiliki nama dagang Superplast produksi Iterchemica, dengan spesifikasi teknis ditampilkan pada Tabel 1 berdasarkan data dari manufaktur (C.G. Daniel et al. 2022). Campuran yang terbentuk kemudian dipadatkan melalui alat pemadat Marshall dengan jumlah tumbukan 75 kali per sisi (total 150 kali).

**Tabel 1.** Sifat fisik dan mekanis polimer EVA Superplast

Propertis	Nilai	Satuan
Warna	Abu-abu	
Berat jenis	0.4 – 0.6	gr/cm <sup>3</sup>
Titik leleh	150	°C

Sumber: (Iterchemica, n.d.)

Adapun untuk aplikasi produksi campuran aspal menggunakan PMB, seperti yang terlihat pada Gambar 1 (Kanan), campuran dipanaskan dalam suhu 180°C dengan durasi yang serupa untuk menjaga workabilitas pada saat proses pencampuran dan kompaksi. Selain itu, polimer EVA tidak digunakan lagi di dalam sampel ini. Alat-alat yang digunakan untuk produksi ditampilkan pada Gambar 2 (kiri). Spesifikasi material dan *mix design* akan ditampilkan pada segmen berikutnya.



**Gambar 1.** (Kiri) Campuran aspal menggunakan polimer EVA dan (Kanan) Campuran aspal menggunakan PMB PG-76

### Pengukuran sifat volumetrik dan mekanis

Selain pengukuran dampak lingkungan dan analisis menggunakan metode LCA, sampel aspal yang diproduksi juga diobservasi terhadap sifat volumetrik dan mekanismenya. Sifat volumetrik yang diobservasi antara lain berat isi, rongga udara, serta rongga pada mineral (*Void in Mineral Aggregate – VMA*). Pengujian sifat volumetrik spesimen adalah bagian dari pengujian parameter Marshall dilakukan dengan metode standar SNI 06-2489-

1991, dimana sampel padat berbentuk silinder ditimbang beratnya pada tiga kondisi: kondisi kering, dalam air, serta kering permukaan (*Saturated Surface Dry - SSD*). Sifat mekanis yang didapatkan dari pengujian Marshall yakni stabilitas, kelelahan (*flow*), serta *Marshall Quotient* (MQ). Semua ini bertujuan untuk membandingkan performa dari HMA modifikasi polimer EVA dengan HMA yang menggunakan PMB. Sampel yang diuji pada penelitian kali ini ditunjukkan pada Gambar 2 (Kanan).



**Gambar 2.** (Kiri) Peralatan untuk Produksi Sampel dan (Kanan) Sampel Briket Aspal hasil produksi

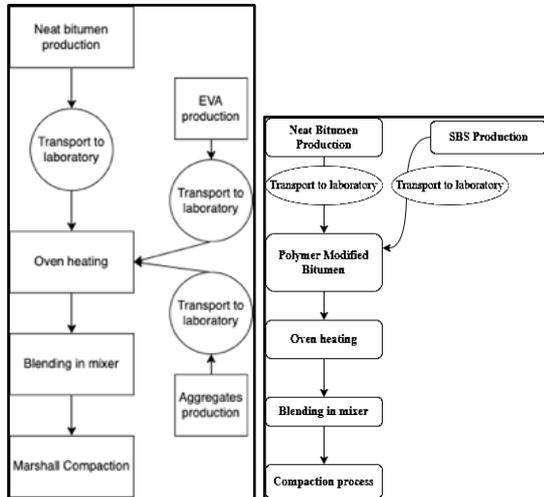
### Tahapan *Life-Cycle Assessment* (LCA)

Tahap 1: Penentuan Unit Fungsi dan Cakupan (*Scope*)

Perumusan tujuan analisis perlu ditetapkan secara kuantitatif sehingga penentuan titik kritis, atau perbandingan antara dampak lingkungan suatu produk/metode dapat terjaga objektivitas dan terukur. Terkait itu, maka dibuatlah suatu unit fungsi yang menyatakan tujuan analisis secara kuantitatif. Sesuai dengan tujuan dari studi ini untuk mengukur dampak lingkungan dari aplikasi produksi campuran aspal panas (HMA) yang menggunakan PMB dibandingkan yang menggunakan modifikasi polimer EVA dengan metode pencampuran kering (*dry mix*), maka unit fungsi yang digunakan dalam studi ini adalah analisis dampak lingkungan akibat produksi masing-masing 5 sampel, atau 6.986 kilogram, untuk 3 jenis campuran aspal, yakni campuran yang menggunakan material PMB, serta menggunakan polimer EVA dengan kadar 5% dan 6% dari berat bitumen.

Setelah menetapkan unit fungsi, suatu analisis LCA perlu menetapkan batasan masalah, yang dikenal dengan istilah ruang lingkup (*scope*). Pemilihan ruang lingkup untuk studi ini dilakukan dalam cakupan *Cradle-to-Gate*, yang dimulai dari proses produksi

material penyusun campuran (bitumen standar 60/70 atau alternatif PMB PG76, agregat, dan polimer EVA untuk HMA modifikasi polimer) hingga proses pembuatan spesimen di laboratorium. Batasan sistem yang digunakan di dalam kajian ini untuk penentuan dampak lingkungan ditampilkan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Batasan system LCA untuk (kiri) analisis produksi HMA modifikasi EVA dan (kanan) produksi HMA menggunakan PMB

Tahap 2: Metode akuisisi data dampak lingkungan di laboratorium

Tahap selanjutnya analisis LCA adalah analisis inventori, yang dibuat berdasarkan bank data (*database*) yang tersedia secara global maupun regional. Selain menggunakan data sekunder dari *database* yang ada, pengumpulan inventori dapat dilakukan dari hasil pengukuran langsung di lapangan yang umumnya dilakukan dengan dua metode, yakni dengan mengukur konsentrasi polutan pada udara ambien yang dikenal dengan nama metode *Ambient Air Quality Monitoring* (AQM) serta pengukuran emisi pada sistem tertutup yang dikenal dengan metode *Continuous Emission Monitoring* (CEM). Pengukuran dengan metode AQM bertujuan untuk mengecek perbandingan komposisi udara pada suatu lokasi dengan kondisi sebelum munculnya konsentrasi polusi dominan (atau biasa disebut *background concentration*) dengan setelah munculnya sumber emisi / polusi (Tiwary and Colls 2010). Sementara pada metode CEM, sistem yang akan diukur perlu diisolasi dari pengaruh eksternal sehingga emisi yang diukur dari suatu luaran dapat diukur untuk menghasilkan kadar murni polusi yang

tidak tercampur dengan udara ambien, hanya saja dengan biaya pengujian yang lebih tinggi karena konfigurasi yang rumit (Jahnke 2022).

Dalam kajian ini, pengumpulan data inventori dilakukan melalui dua fase. Untuk fase pertama, data yang diperlukan diperoleh langsung melalui pengukuran emisi di laboratorium menggunakan alat *Indoor Air Quality Measurement* (AQM) merk *Dienmerrn* tipe 502-03 dengan jangkauan pengukuran hingga 100 meter dan ketepatan pengukuran tiap 1.5 detik yang dilakukan pada seluruh proses produksi di laboratorium mulai dari pemanasan material campuran, pencampuran di *mixer*, serta pemadatan di alat kompaksi. Sensor yang digunakan untuk mengukur PM berupa *laser scattering*, untuk pengukuran formaldehida menggunakan sensor elektrokimia, sedangkan sensor yang digunakan untuk mengukur VOC berupa sensor semikonduktor.

Alat AQM diletakkan tepat di atas permukaan peralatan produksi yang digunakan sehingga dapat mencatat tingkat emisi yang dihasilkan dengan sepresisi mungkin, seperti terlihat pada Gambar 4. Untuk setiap sampel yang diproduksi diberikan selang waktu pengukuran sebanyak 10 menit agar alat pengukur dapat terkalibrasi kembali ke posisi awal tanpa adanya interferensi nilai dari hasil pengukuran emisi kegiatan produksi sampel sebelumnya.



**Gambar 4.** Pengukuran nilai emisi pada (kiri) oven, (tengah) mixer dan (kanan) alat kompaksi Marshall

Gedung laboratorium UPH, yang ditunjukkan pada Gambar 5, telah dijaga dalam kondisi terisolasi agar tingkat emisi ambien dapat terjaga dengan stabil. Akses sirkulasi udara dapat dibuka ketika proses produksi satu sampel selesai untuk menetralkan emisi yang timbul untuk kemudian ditutup kembali saat kegiatan produksi sampel berikutnya mulai dilaksanakan.



**Gambar 5.** Interior dan eksterior ruangan laboratorium aspal UPH

Selain hasil dari pengukuran emisi di laboratorium, data untuk analisis juga diperoleh dari faktor transportasi setiap material bahan baku ke laboratorium UPH sesuai Gambar 6, dan diukur tingkat jarak tempuhnya menggunakan aplikasi *Google Maps* untuk kemudian diproses lebih lanjut dengan bank data sekunder, juga dengan aspek fabrikasi masing-masing material bahan baku campuran aspal tersebut, yakni agregat, bitumen penetrasi 60/70, polimer EVA, dan PMB. Data sekunder ini dikonversikan ke inventori dampak berdasarkan pada *database Ecoinvent*, sedangkan untuk produksi bahan bitumen menggunakan data dari Eurobitume.



**Gambar 6.** Transportasi (kiri) bitumen 60/70 dan PMB (tengah) material agregat dan (kanan) polimer EVA ke UPH

Tahap 3: Pengolahan data inventori dan analisis dampak

Pada studi ini, data inventori yang telah dihimpun kemudian digunakan untuk proses evaluasi dampak setelah dikalibrasikan ke masing-masing faktor dampak menggunakan faktor karakteristik (*characterization factor – CF*) yang diambil dari *CML-IA Midpoint Category (Centrum voor Milieukunde Leiden)* dari Universitas Leiden, Belanda sesuai dengan Persamaan (1).

$$Impact\ Category = \sum Output \times CF \quad (1)$$

Empat kategori dampak yang menjadi hasil kajian ini yakni *Global Warming Potential (GWP)*, *Human and Freshwater Ecotoxicity Potential (HTP and FAETP)*, dan *Photochemical Oxidation Potential (POP)* yang didapatkan dengan konversi data dari inventori dengan faktor karakteristik (*characterisation factor – CF*) dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Tabel daftar faktor karakteristik untuk dampak yang dianalisis

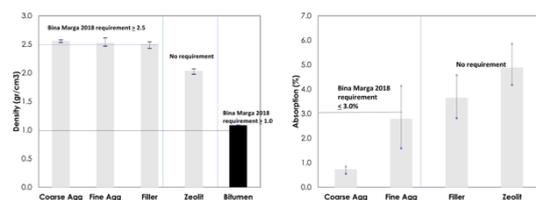
Jenis emisi	GWP	FAETP	HTP	POP
CO <sub>2</sub>	1	0	0	0
VOC	0	0.000000837	1900	0.0092
HCHO	0	8.26	0.83	0
PM <sub>1</sub>	0	0	0.82	0
PM <sub>2,5</sub>	0	0	0.82	0
PM <sub>10</sub>	0	0	0.82	0

Sumber: *CML-IA Database, Midpoint*

GWP adalah suatu kategori dampak yang menggambarkan efek pemanasan global akibat gas rumah kaca, yang dinyatakan dalam satuan referensi kg CO<sub>2</sub>-eq (Ain, Auvaria, dan Nurmaningsih 2022). FAETP sebagai kategori dampak digunakan untuk menyatakan dampak polusi terhadap ketersediaan air bersih terkait dengan kerusakan ekosistem yang dapat merusak kerusakan keanekaragaman hayati dan dinyatakan dalam satuan referensi kg 1,4-*Dichlorobenzene-eq* (Centre for Ecotoxicology and of Chemicals 2016). HTP sebagai dampak merupakan potensi menghasilkan zat beracun yang dapat membahayakan lingkungan khususnya manusia dan dinyatakan dalam satuan referensi kg 1,4-*Dichlorobenzene-eq* (Mckone and Hertwich 2001; Hertwich et al. 2001). Sedangkan POP digunakan untuk menyatakan polusi udara sekunder yang terjadi akibat reaksi antara cahaya dengan emisi dari pembakaran dengan bahan bakar fosil, dan dinyatakan dalam satuan kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq (Tarannum et al. 2021; Life Cycle Association of New Zealand 2019).

## HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian sifat-sifat volumetrik dan reologi material komponen campuran aspal pada studi ini disajikan pada Gambar 7 serta Tabel 3.

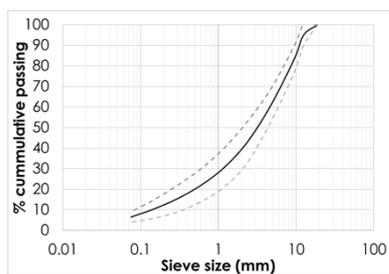


**Gambar 7.** (Kiri) Berat jenis dan (kanan) penyerapan material komponen campuran aspal

**Tabel 3.** Sifat reologi material bitumen

Sifat reologi	Hasil	Syarat (Bina Marga 2018)
Penetrasi (mm <sup>-1</sup> )	67.4	60 – 70
Titik lembek (°C)	48	≥ 48
Titik nyala (°C)	314	≥ 280

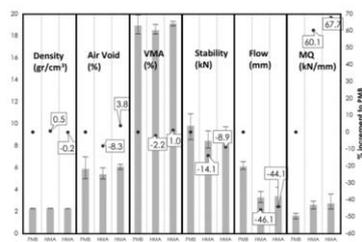
Dari Tabel 3, dapat dilihat bahwa material yang digunakan telah memenuhi persyaratan dalam Standar Bina Marga 2018. Kemudian, gradasi campuran aspal yang akan diproduksi juga berdasarkan kriteria pada Standar Bina Marga 2018 yang disajikan pada Gambar 8. Sedangkan kadar aspal yang digunakan adalah 5.5% yang mengikuti penelitian penulis sebelumnya (C.G. Daniel et al. 2022).



**Gambar 8.** Gradasi campuran aspal rencana berdasarkan Bina Marga 2018

### Perbandingan Sifat Volumetrik dan Marshall

Pengujian sifat volumetrik dan mekanis dilakukan untuk membandingkan sifat-sifat dari campuran aspal yang diproduksi menggunakan polimer EVA dengan metode pencampuran kering (*dry mix*) dan menggunakan produk PMB, dengan hasil observasi dapat dilihat pada Gambar 9.



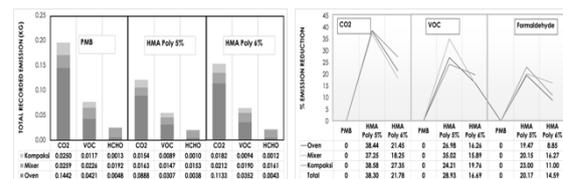
**Gambar 9.** Hasil pengujian volumetrik dan Marshall campuran aspal

Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa sifat volumetrik campuran aspal yang menggunakan polimer EVA tidak memiliki

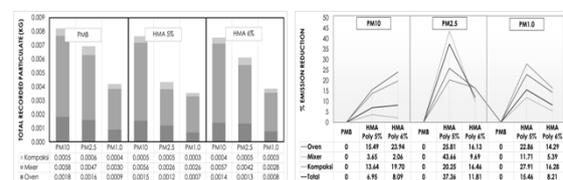
perbedaan signifikan dibandingkan dengan campuran yang menggunakan PMB, yang terlihat dari nilai berat isi, rongga udara dan VMA yang memiliki perbedaan < 10% (0.5%, 8.3% dan 2.2%). Dapat dilihat juga bahwa stabilitas Marshall sampel aspal yang menggunakan polimer EVA berada sedikit di bawah sampel aspal dengan PMB dengan selisih maksimum pada 14.1%, juga dengan kelelahan yang berada pada selisih hingga 46.1%. Meninjau dari segi *Marshall Quotient* (MQ), dimana campuran aspal dengan polimer EVA memiliki nilai yang relatif jauh lebih tinggi dari yang menggunakan PMB dengan selisih hingga 67.7%, dapat disimpulkan bahwa penggunaan polimer EVA meningkatkan kekakuan campuran aspal hingga melebihi penggunaan PMB yang berbahan dasar elastomer, tetapi tidak selalu berarti memiliki kekuatan yang lebih tinggi.

### Hasil Pencatatan Emisi pada Laboratorium

Pada sub bab ini, hasil pengukuran tingkat emisi di laboratorium aspal UPH akan diulas dan ditampilkan pada Gambar 10 - Gambar 11.



**Gambar 10.** (Kiri) Hasil pengukuran emisi CO<sub>2</sub>, VOC, dan formaldehida dan (kanan) persentase selisih terhadap sampel kontrol (PMB)



**Gambar 11.** (Kiri) Hasil pengukuran emisi partikulat dan (kanan) persentase selisih terhadap sampel kontrol (PMB)

Berdasarkan gambar Gambar 10, dapat dilihat bahwa proses pemanasan di oven menjadi penyumbang terbesar emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan *Volatile Organic Compound* (VOC), dengan rasio hingga mencapai 73 – 74% dari total emisi CO<sub>2</sub> serta 55 – 56.6% total emisi VOC. Penggunaan suhu pencampuran yang tinggi menjadi faktor kritis

dalam hasil yang didapatkan ini. Adapun penggunaan EVA dengan dosis 5% memberikan penurunan emisi CO<sub>2</sub> yang konstan pada setiap fase produksi, mulai dari pemanasan material di oven hingga pemadatan pada alat *Marshall Compactor* sebesar 38%. Di sisi lain, penggunaan polimer EVA sebanyak 6% menghasilkan reduksi yang cukup bervariasi antara 18.25% saat proses pencampuran hingga 27% saat proses kompaksi. Nilai yang relatif lebih rendah pada proses pencampuran dapat disebabkan oleh workabilitas campuran yang dipengaruhi oleh penggunaan polimer yang dicampurkan dengan cara kering.

Emisi kedua yang tercatat yaitu VOC, yang memiliki tendensi yang serupa dengan emisi CO<sub>2</sub> yang dibahas sebelumnya. Berkaitan dengan ini, maka dapat terlihat bahwa fase pemanasan di oven menjadi faktor utama dalam total emisi tercatat dengan rasio hingga 55 – 56%, disusul dengan proses pencampuran di mixer dengan rentang 27 – 30% dari total emisi tercatat. Efek dari penurunan suhu pengerjaan tersebut juga dapat terlihat dari adanya penurunan emisi pada tiap fase, dengan selisih hingga 35% pada fase pencampuran di mixer, 27% pada tahap pemanasan oven dan 24.21% pada saat pemadatan; hal ini terutama terlihat pada aplikasi polimer EVA 5%.

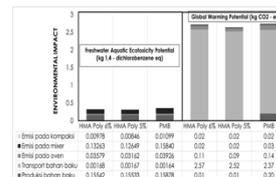
Jenis emisi berikutnya yang tercatat yaitu formaldehida (HCHO). Fase pencampuran di mixer menjadi sumber emisi HCHO tertinggi pada tahap produksi sampel dengan proporsi antara 74 – 76% dari total emisi yang tercatat, sementara tahap pemanasan bahan baku di oven hanya menghasilkan hingga 20% dari total emisi tercatat. Hal ini menjadi konfirmasi hasil temuan EPA sebelumnya, bahwa proses pemanasan dan produksi campuran aspal menghasilkan HCHO dalam jumlah yang cukup signifikan. Selain itu, terjadi penurunan tingkat emisi yang tercatat pada setiap fase dalam proses produksi campuran aspal dengan modifikasi polimer menggunakan metode campuran kering dengan rata-rata 20.87% untuk penggunaan 5% polimer dan 12% untuk penggunaan 6% polimer, dibandingkan dengan penggunaan PMB, dengan penurunan terbesar juga tercatat pada proses pencampuran dengan mixer.

Jenis emisi terakhir yang tercatat pada studi ini ditampilkan pada Gambar 11 adalah

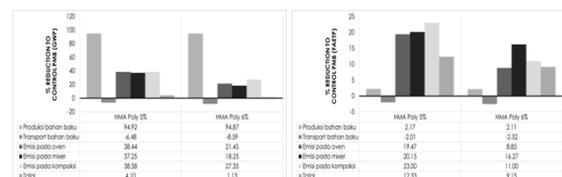
zat partikulat (*Particulate Matter* – PM) yang terbagi atas tiga sub-klasifikasi, yakni PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, dan PM<sub>1</sub>. Terlihat bahwa kontribusi dari proses pencampuran di mixer menghasilkan tingkat emisi terbesar hingga berada para rentang 60 – 76%, dan hasil ini tidak secara eksplisit menunjukkan dampak dari perbedaan aplikasi polimer pada campuran aspal. Adapun perbedaan ini baru terlihat pada proses pemanasan di oven yang lazim menggunakan kipas untuk menghantarkan suhu panas, dimana suhu yang lebih tinggi dapat menghasilkan emisi partikulat yang lebih besar pada kasus penggunaan PMB untuk campuran aspal dengan selisih sebesar 15.5% - 24% untuk PM<sub>10</sub>, 16.13 – 26% untuk PM<sub>2.5</sub>, dan 14.3 – 23% untuk PM<sub>1</sub>.

### Hasil Analisis LCA

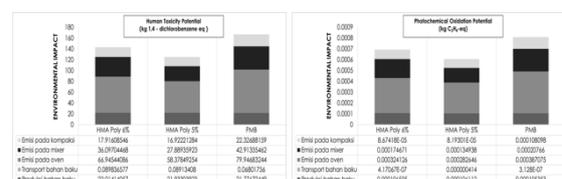
Bagian ini mengulas hasil analisis kajian LCA dalam membandingkan dampak dari produksi 5 sampel aspal, atau total 6.986 kg sampel, menggunakan polimer EVA dengan metode pencampuran kering serta penggunaan bitumen modifikasi polimer (PMB) dengan metode campuran basah, yang ditampilkan pada Gambar 12 - Gambar 15.



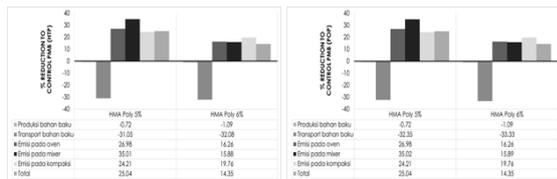
**Gambar 12.** Total dampak GWP dan FAETP akibat produksi aspal skala lab



**Gambar 13.** Selisih dampak (kiri) GWP dan (kanan) FAETP dibandingkan sampel kontrol (PMB)



**Gambar 14.** Total dampak (kiri) HTP dan (kanan) POP akibat produksi aspal skala lab



**Gambar 15.** Selisih dampak (kiri) HTP dan (kanan) POP dibandingkan sampel kontrol (PMB)

Hasil analisis LCA menunjukkan tingkat dampak *Global Warming Potential* (GWP) tertinggi pada penggunaan teknologi PMB untuk campuran aspal yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Aspek transportasi material bahan baku ke laboratorium UPH menjadi kontributor terbesar dalam faktor ini hingga mencapai 85 – 95% dari total dampak, disusul dengan faktor pemanasan material di oven sebelum pencampuran sebesar 3 – 5% dari total dampak, dimana pemanasan pada suhu yang lebih tinggi untuk produksi PMB menyebabkan emisi yang lebih tinggi sebesar 21.45% - 8.44% lebih besar dari campuran aspal panas. Adapun produksi bahan baku PMB memegang peranan yang cukup besar hingga mencapai 7.3%, atau sekitar 20 kali lebih besar dari aspek yang sama pada campuran aspal yang memakai EVA. Hal ini dapat disebabkan oleh proses pencampuran antara bitumen murni dengan polimer SBS beserta aditif kimia untuk penambahan adhesi antara polimer dan bitumen yang menghasilkan ekstra dampak dibandingkan dengan penggunaan EVA pada penelitian ini yang langsung dicampurkan pada saat proses produksi campuran aspal.

Faktor kedua yang dianalisis adalah FAETP yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Pada kategori dampak ini, faktor yang paling dominan adalah tahap produksi bahan baku, dengan rentang antara 43 – 48% dari total dampak, dan emisi pada tahap pencampuran di mixer hingga 39 – 43% dari total dampak. Yang menarik adalah suhu yang lebih tinggi ini juga mempengaruhi selisih tingkat emisi antara penggunaan material PMB dan polimer pada campuran aspal dengan metode campuran kering, yang tercatat pada tahap pemanasan hingga kompaksi dengan rentang 8.85% - 23%.

Dua jenis dampak terakhir adalah HTP dan POP ditunjukkan pada Gambar 14 - Gambar 15, dimana emisi VOC menjadi jenis emisi yang paling dominan pada kedua kategori ini. Disini terlihat bahwa kenaikan suhu

produksi untuk penggunaan material PMB menjadi faktor penentu pada kedua dampak ini, dengan proporsi di antara 46 - 47% dari total dampak yang dihasilkan, disusul oleh faktor emisi tercatat pada proses pencampuran hingga 22 – 25% dari total dampak, dan penurunan suhu produksi ini menyebabkan rasio dampak pada aspek pemanasan di oven hingga proses pemadatan di kompaktor hingga mencapai 16 – 35% secara rata-rata. Selain itu, faktor produksi material bahan baku untuk kedua tipe campuran ini memiliki peran yang relatif penting, dengan kontribusi rata-rata 13 – 17.5% dari total dampak yang dihasilkan.

## PEMBAHASAN

### Interpretasi Hasil Uji Marshall

Hasil pengujian volumetrik dan mekanis Marshall menunjukkan nilai yang sesuai kriteria standar Bina Marga 2018 untuk seluruh sampel campuran aspal yang menggunakan PMB maupun polimer EVA. Adapun selisih nilai parameter volumetrik yang relatif insignifikan (<10%) menyiratkan bahwa penggunaan EVA yang memiliki berat jenis yang kecil tidak memodifikasi sifat volumetrik campuran aspal dibandingkan penggunaan PMB. Selain itu, nilai stabilitas Marshall sampel campuran aspal modifikasi EVA yang sedikit lebih kecil, kelelahan (*flow*) yang mencapai hingga separuh, serta MQ yang bahkan lebih kecil dengan selisih lebih dari 60% dari sampel aspal yang menggunakan PMB menyiratkan sifat campuran yang lebih getas akibat penggunaan polimer EVA termoplastik dibandingkan PMB yang berbahan dasar SBS elastomer. Hanya saja, rasio perbedaan kekuatan yang relatif kecil (< 15%) dan nilai stabilitas yang berada di atas 8 kN membuat metode modifikasi campuran aspal dengan mencampurkan polimer EVA dengan metode kering menjadi alternatif yang cukup menjanjikan dari segi mekanis.

### Interpretasi hasil pengukuran emisi lab

Penggunaan suhu pemanasan yang lebih tinggi pada produksi campuran aspal menggunakan PMB terbukti mencatat emisi total CO<sub>2</sub> sebesar 0.195kg / 6.986 kg campuran (dengan persentase emisi sebesar 4.22% dari material produksi), dengan kenaikan hingga 21.78 – 38.3% lebih tinggi dibandingkan produksi campuran aspal dengan modifikasi

polimer EVA menggunakan metode campuran kering (*dry mix*) sebesar 0.12 kg dan 0.153 kg / 6.986 kg campuran (persentase emisi sebesar 1.71 dan 2.19% dari berat sampel yang diproduksi). Hasil analisis sebelumnya memperlihatkan pengaruh dari suhu pengerjaan yang lebih tinggi dalam pengaruhnya terhadap hasil total ini. Perbandingan yang dibuat ini serupa dengan pencatatan pada studi kasus di Chili dengan produksi aspal untuk jalan ukuran 1 km dan lebar 3.5 m yang memperlihatkan penurunan emisi CO<sub>2</sub> akibat aplikasi polimer dengan cara kering sebesar 33% (Movilla-Quesada et al. 2021). Hal ini juga emisi total VOC yang tercatat pada proses produksi sampel campuran aspal menggunakan PMB, dengan total 0.0764 kg / 6.986 kg campuran atau 1% emisi VOC pada proses produksi, dan terjadi penurunan hingga 16.69 – 28.93% atau sebesar 0.054 dan 0.064 kg / 6.986 kg sampel (0.77 dan 0.92%) untuk campuran aspal yang menggunakan polimer EVA dan metode pencampuran kering (*dry mix*). Dapat terlihat juga bahwa suhu pemanasan material, terutama bitumen, yang tinggi dapat menyebabkan proses oksidasi pada bitumen yang menghasilkan senyawa volatil yang mudah terurai, sehingga menghasilkan pencatatan VOC yang tinggi. Hasil yang cukup beragam ini juga dapat terlihat dari kajian lain yang menggambarkan hasil emisi VOC dari penggunaan karet vulkanisir dengan metode campuran kering dibandingkan dengan campuran aspal menggunakan PMB berbasis dasar SBS dari 5% hingga hampir 20% (Bueno et al. 2021). Pencatatan emisi HCHO pun memiliki tendensi yang sama, dengan emisi total yang dihasilkan oleh produksi sampel dengan PMB mencapai 0.0253 kg / 6.986 kg sampel campuran aspal (persentase emisi sebesar 0.36%), dan penggunaan EVA pada campuran aspal dengan metode campuran kering menghasilkan penurunan emisi sebesar 14.6% - 20.17%, atau tingkat emisi tercatat sebesar 0.02 kg dan 0.022 kg / 6.986 kg sampel aspal (persentase emisi terhadap berat produksi sampel sebesar 0.29% dan 0.31%).

Untuk emisi partikulat, terlihat dari hasil pengukuran emisi pada studi ini bahwa produksi campuran aspal, baik yang menggunakan PMB maupun polimer dengan metode campuran kering mencatatkan emisi yang relatif kecil, dimana emisi maksimum

yang tercatat sebesar 0.0082 kg PM<sub>10</sub>, 0.0069 kg PM<sub>2.5</sub>, dan 0.0042 kg PM<sub>1</sub> untuk produksi 6.986 kg sampel campuran aspal (persentase emisi sebesar 0.12%, 0.1%, dan 0.06%), yang semuanya dicatatkan dari proses produksi aspal menggunakan PMB. Adapun aplikasi polimer sebanyak 5% dan 6% berat bitumen dengan cara dicampurkan langsung dapat menurunkan tingkat emisi zat partikulat tersebut dengan rentang 7 – 8% untuk PM<sub>10</sub> (0.0075 dan 0.0076 kg / 6.986 kg sampel dan persentase emisi sebesar 0.107% dan 0.109%), 12 – 37% untuk PM<sub>2.5</sub> (0.004 dan 0.006 kg / 6.986 kg sampel dan persentase emisi sebesar 0.06% dan 0.09%), dan 8 – 15.5% untuk PM<sub>1</sub> (0.0036 dan 0.0039 kg / 6.986 kg sampel dan persentase emisi sebesar 0.05% dan 0.06%), dengan pemanasan pada oven menjadi faktor yang dominan menyumbang nilai emisi tercatat. Penurunan tingkat emisi yang dominan disebabkan oleh faktor suhu produksi yang lebih rendah juga ditemui dalam perbandingan antara produksi campuran aspal hangat dengan suhu 20-30°C lebih rendah dari campuran aspal panas standar sebesar 25 – 55% (Xiu et al. 2020; Martin, Kerstin, and Joachim 2019; Tang et al. 2020; Giustozzi et al. 2022b).

Secara total, dapat disimpulkan melalui hasil pengujian pada tahap ini bahwa penggunaan suhu untuk produksi campuran aspal yang lebih tinggi pada kasus penggunaan PMB menyebabkan emisi CO<sub>2</sub>, VOC dan formaldehida yang lebih besar yang berasal dari reaksi bitumen, serta zat partikulat - PM yang mayoritas berasal dari komponen agregat yang digunakan. Selain itu, penggunaan polimer EVA pada suhu pengerjaan tertinggi di 160°C tidak menyebabkan terjadinya degradasi akibat stabilitas termal polimer tersebut yang relatif tinggi, sehingga tidak menimbulkan ekstra emisi.

### **Interpretasi Hasil Analisis Dampak LCA**

Hasil analisis LCA menunjukkan tingkat dampak *Global Warming Potential* (GWP) tertinggi pada penggunaan teknologi PMB untuk campuran aspal dengan emisi mencapai 2.8kg CO<sub>2</sub>-eq / 6.986 kg sampel aspal (persentase emisi mencapai 40% dari berat produksi sampel) dengan selisih mencapai 1.1 – 4.1% dari sampel campuran aspal panas menggunakan polimer EVA, dimana penggunaan EVA sebesar 5% dan 6%

menghasilkan dampak GWP sebesar 2.65kg dan 2.73kg CO<sub>2</sub>-eq / 6.986 kg sampel aspal, atau persentase emisi sebesar 38% dan 39%. Faktor transportasi disini menjadi bagian mayoritas dalam penelitian ini disebabkan oleh faktor kuantitas produksi yang kecil dibandingkan jarak transportasi material yang relatif besar, sehingga proporsi faktor ini menjadi dominan. Faktor pemanasan di oven pun cukup besar akibat emisi dari pembakaran pada system oven yang ditambah dengan emisi yang berasal dari senyawa bitumen yang terurai saat dipanaskan. Nilai yang dihasilkan pada studi ini cenderung lebih besar dibandingkan studi yang serupa di Italia tetapi menggunakan karet ban, dimana produksi 1 kg sampel aspal menghasilkan dampak GWP sebesar 0.2 kg CO<sub>2</sub>-eq, dan faktor suhu pencampuran dan transportasi material juga menjadi faktor penting pada kajian ini (Lima et al. 2022; Landi et al. 2020).

Faktor kedua yang dianalisis adalah FAETP, dimana terlihat bahwa produksi sampel HMA dengan polimer EVA menghasilkan dampak yang lebih kecil dengan selisih hingga 9.15 – 12.33% dari sampel campuran aspal dengan teknologi PMB, dengan total dampak FAETP akibat penggunaan PMB hingga mencapai 0.37 kg 1.4-DB eq/ 6.986 kg (persentase emisi sebesar 5.3% dari berat produksi sampel). Adapun penggunaan EVA dengan dosis 5% dan 6% menghasilkan dampak FAETP sebesar 0.32 kg dan 0.34 kg / 6.986 kg sampel aspal, dengan persentase emisi sebesar 4.6% dan 4.9%. Emisi formaldehida (HCHO) menjadi sumber terbesar untuk dampak FAETP terutama pada saat proses pencampuran sampel, dan di sini terlihat bahwa suhu produksi sampel yang lebih tinggi menyebabkan pembentukan senyawa HCHO yang lebih tinggi dan menghasilkan nilai dampak yang lebih besar, terutama pada saat pencampuran di dalam mixer. Dapat disimpulkan bahwa aplikasi polimer pada campuran aspal panas dengan metode pencampuran kering yang mensyaratkan suhu pengerjaan 20°C lebih rendah dibandingkan penggunaan PMB menjadi faktor kritis dalam mengurangi nilai dampak FAETP hingga mencapai rata-rata 10.7% untuk penggunaan polimer EVA 5% dan 6% dari berat total campuran. Pengaruh suhu campuran yang lebih tinggi telah terbukti menghasilkan nilai dampak FAETP yang lebih

besar, seperti terlihat pada hasil kajian serupa yang mengevaluasi dampak dari produksi campuran aspal hangat dengan suhu pengerjaan 20 – 30°C lebih rendah dari campuran aspal panas standar, dengan tingkat reduksi kurang dari 5% (Martinez-Soto et al. 2023).

Dua jenis dampak terakhir adalah HTP dan POP. Produksi sampel campuran aspal dengan menggunakan PMB menghasilkan dampak total hingga 14.35 – 25% lebih besar dibandingkan penggunaan polimer dengan cara pencampuran kering atau rata-rata sebesar 19.7% lebih besar, dengan total dampak HTP yang dihasilkan penggunaan PMB hingga mencapai 167 kg 1.4-DB eq (persentase emisi sebesar 2391%) dan POP sebesar 0.00081 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq / 6.986 kg (persentase emisi sebesar 0.012%). Penggunaan EVA dengan dosis 5% dan 6% menghasilkan dampak HTP sebesar 125.21 dan 143.06 kg 1.4-DB eq / 6.986 kg sampel aspal (persentase emisi sebesar 1792% dan 2048%), serta dampak POP sebesar 0.00061 kg dan 0.00069 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq (persentase emisi sebesar 0.009% dan 0.01%). Hal ini juga dominan disebabkan oleh selisih dari suhu produksi, yang telah diperlihatkan pada bagian sebelumnya. Pengaruh penurunan suhu produksi terhadap penurunan nilai dampak HTP dan POP juga dilaporkan dari kajian lain terhadap seluruh daur hidup struktur jalan di Perancis yang mencapai 5% dan 8.5%, lebih kecil dari hasil kajian ini (Santos et al. 2018). Pengaruh temperatur yang lebih rendah ini juga dapat dilihat dari hasil kajian yang membandingkan dampak dari produksi campuran aspal hangat dengan temperatur produksi 20 – 30°C lebih rendah dari campuran aspal panas standar, dengan reduksi dampak hingga 25% pada studi kasus di Korea Selatan (Martinez-Soto et al. 2023; Mazumder et al. 2016). Lebih jauh lagi, untuk ketiga jenis dampak terakhir (FAETP, HTP, dan POP), kontribusi dari produksi campuran aspal menjadi faktor penyumbang dampak terbesar berdasarkan hasil kajian menggunakan campuran aspal daur ulang dan karet bekas dengan temperatur kerja yang lebih rendah (Bressi et al. 2021).

Dari keempat jenis dampak lingkungan yang dianalisis pada studi ini, terlihat jelas bahwa aplikasi bitumen modifikasi polimer atau PMB membutuhkan suhu pencampuran yang lebih tinggi sehingga menghasilkan

dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan polimer yang dicampurkan langsung pada saat produksi campuran aspal berlangsung, yang dikenal dengan metode campuran kering (*dry mix*). Hanya saja, perlu diperhatikan bahwa penggunaan material ekstra sebagai bahan baku menghasilkan tingkat dampak yang cukup berpengaruh untuk analisis keseluruhan, serta transportasi material bahan baku ke lokasi produksi pun menyumbang kontribusi signifikan ke total dampak GWP, sehingga perlu diperhatikan lebih lanjut ke depannya.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

*Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan untuk mengkaji dampak lingkungan dari produksi campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt* – HMA) modifikasi polimer EVA dengan dosis 5% dan 6% berat bitumen dengan HMA yang menggunakan PMB sebagai binder pada skala laboratorium, dengan juga membandingkan sifat volumetrik dan mekanismenya. Unit fungsi pada kajian ini adalah dampak lingkungan dari proses produksi 5 sampel aspal dengan tiga bahan berbeda seperti yang dijelaskan sebelumnya.

*Scope* kajian LCA adalah *cradle-to-gate*, dengan data dampak lingkungan merupakan kombinasi *database* Ecoinvent dan Eurobitume untuk produksi bahan baku, serta pengukuran emisi pada proses produksi sampel aspal di Laboratorium Aspal Universitas Pelita Harapan. Emisi yang tercatat adalah CO<sub>2</sub>, dimana penggunaan PMB mencatat hasil 0.195 kg/ 5 sampel, 21.78 – 38.3% lebih tinggi dari campuran aspal menggunakan polimer EVA dengan metode pencampuran kering (*dry mix*), Volatile Organic Compound (VOC) dengan penggunaan PMB mencatat hasil 0.0764 kg/ 5 sampel yang 16.69 – 28.93% lebih besar dibandingkan campuran aspal yang menggunakan polimer EVA, dimana kontribusi terbesar untuk keduanya berasal dari pemanasan oven. Emisi formaldehida (HCHO) untuk sampel dengan PMB tercatat 0.025 kg/ 5 sampel yang 14.6 – 20.17% lebih besar dari sampel yang menggunakan polimer EVA, dan emisi partikulat (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>), dimana penggunaan PMB menghasilkan emisi sebesar 0.0082 kg PM<sub>10</sub>, 0.0069 kg PM<sub>2.5</sub>, dan 0.0042

kg PM<sub>1</sub> untuk 5 sampel, 7 – 37% lebih tinggi dari sampel yang menggunakan polimer EVA, dan kedua tipe emisi ini mayoritas berasal dari proses pencampuran di mixer.

Beberapa kategori dampak hasil analisis LCA yakni *Global Warming Potential* (GWP), dimana penggunaan PMB menghasilkan nilai 2.8kg CO<sub>2</sub>-eq / 5 sampel atau 1.1 – 4.1% lebih tinggi dari campuran dengan polimer EVA akibat faktor transportasi bahan baku yang dominan, *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential* (FAETP) dimana hasil dari aplikasi PMB sebesar 0.32 kg 1.4-DB eq/ 5 sampel, 9.15 – 12.33% lebih besar dari campuran dengan polimer EVA, kemudian *Human Toxicity Potential* (HTP) dan *Photochemical Oxidation Potential* (POP) dengan hasil dari aplikasi PMB sebesar 167 kg 1.4-DB eq dan 0.00081 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq / 5 sampel, atau 14.35 – 25% lebih tinggi dari campuran dengan modifikasi polimer EVA, yang dominan dipengaruhi faktor kenaikan suhu produksi dan pencampuran sampel.

Hasil rata-rata analisis LCA menunjukkan penurunan dampak lingkungan yang dihasilkan oleh pencampuran EVA dengan metode kering (*dry mix*) sebesar 20 – 34% dibandingkan dengan penggunaan PMB. Adapun sifat volumetrik (berat isi, rongga udara dan VMA) menunjukkan nilai yang relatif setara, dan sampel aspal yang dicampurkan polimer EVA secara metode kering menunjukkan tingkat kekakuan (*Marshall Quotient*) yang lebih tinggi hingga 67.7% dan stabilitas Marshall yang sedikit lebih rendah ( $\leq 15\%$ ) dibandingkan campuran aspal yang menggunakan PMB. Sehingga dapat disimpulkan metode aplikasi polimer ke campuran aspal dengan cara pencampuran kering (*dry mix*) dapat menjadi alternatif penggunaan PMB dengan menimbang dampak lingkungan yang dapat direduksi.

### Saran

Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan bekerja sama dengan pihak praktisi untuk mengukur dan mengevaluasi dampak aplikasi polimer dengan metode *dry mix* ini dalam lingkup daur hidup yang lebih luas, hingga akhir masa hidup perkerasan jalan. Pendekatan LCA dapat dilanjutkan untuk menghasilkan bank data untuk keperluan evaluasi dampak lingkungan dengan data lokal untuk evaluasi dampak lingkungan yang lebih akurat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Pelita Harapan atas hibah pembiayaan penelitian nomor 413/LPPM-UPH/XII/2021, serta kepada PT. Enceha Pacific yang menunjang penelitian ini melalui penyediaan material bahan baku.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ain, Thayyibah Nazlatul, Shinfi Wazna Auvaria, dan Dyah Ratri Nurmaningsih. 2022. "Perkiraan Potensi Pemanasan Global Pada Skenario Pengelolaan Sampah Domestik Di Kota Sukabumi." *Jurnal Teknologi Lingkungan* 23 (2): 214–21.
- 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): 1918–1931.
- Araujo, Daniela L.Vega, Joao Santos, and Gilberto Martinez-Arguelles. 2022. "Environmental Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregate for Road Pavements." *International Journal of Pavement Engineering*.
- Bressi, Sara, Joao Santos, Marko Orešković, and Massimo Losa. 2021. "A Comparative Environmental Impact Analysis of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber and Reclaimed Asphalt Pavement Using Life Cycle Assessment." *International Journal of Pavement Engineering* 22 (4): 524–38.
- Bueno, M., R. Haag, N. Heeb, P. Mikhailenko, L. Boesiger, and L. D. Poulikakos. 2021. "Functional and Environmental Performance of Plant-Produced Crumb Rubber Asphalt Mixtures Using the Dry Process." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 54 (5).
- Centre for Ecotoxicology, European, and Toxicology of Chemicals. 2016. "TR127: Freshwater Ecotoxicity as an Impact Category in Life Cycle Assessment." Brussels.
- Daniel, C.G., 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.
- 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.
- Desidery, Luca, Michele Lanotte, and Sheila Devasahayam. 2021. "Effect of Waste Polyethylene and Wax-Based Additives on Bitumen Performance."
- Fistcar, Wawarisa Alnu. 2020. "Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku Dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan-Samarinda." *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 18 (2): 307–14.
- Giustozzi, Filippo, Marie Enfrin, Dai Lu Xuan, Yeong Jia Boom, Hassan Masood, Rebecca Aud, and Michael Swaney. 2022a. *Use of Road-Grade Recycled Plastics for Sustainable Asphalt Pavements: Final Performance and Environmental Assessment Part A*. www.austroads.com.au.
- Giustozzi, Filippo, Marie Enfrin, Dai Lu Xuan, Yeong Jia Boom, Michael Swaney, Rebecca Audy, and Hassan Masood. 2022b. *Use of Road-Grade Recycled Plastics for Sustainable Asphalt Pavements: Final Performance and Environmental Assessment Part B*. www.austroads.com.au.
- Hakami, Ferial, Alokesh Pramanik, Animesh, and Kumar Basak. 2022. *Tribology of Elastomers*. Springer: Berlin.
- Hashim, Azanam Shah, and Siew Kooi Ong. 2016. "Natural Rubber and Its Derivatives." In *Elastomers*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69661>.
- Hertwich, Edgar G, Sarah F Mateles, William S Pease, and Thomas E Mckone. 2001. "Life-Cycle Assessment Human Toxicity Potentials For Life-Cycle Assessment And Toxics Release Inventory Risk Screening." *Environmental Toxicology and Chemistry*. 20(4): 928-939.
- Iterchimica. n.d. "Superplast Polymeric Compound For Bituminous Mixes Modification." www.iterchimica.it.
- Jahnke, James A. 2022. *Continuous Emission Monitoring*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc: Hoboken.
- Landi, Daniele, Marco Marconi, Edoardo Bocci, and Michele Germani. 2020. "Comparative Life Cycle Assessment of Standard, Cellulose-Reinforced and End of Life Tires Fiber-Reinforced Hot Mix Asphalt Mixtures." *Journal of Cleaner Production* 248 (March).
- Life Cycle Association of New Zealand. 2019. "Impact Category. Photochemical Oxidation Potential." [https://lcanz.org.nz/wp/wp-content/uploads/2019/06/photochemical\\_oxidation\\_lcanz.pdf](https://lcanz.org.nz/wp/wp-content/uploads/2019/06/photochemical_oxidation_lcanz.pdf).

- Martin, Hugener, Zeyer Kerstin, and Mohn Joachim. 2019. "Reduced Emissions of Warm Mix Asphalt during Construction." *Road Materials and Pavement Design* 20 (sup2): S568–77.
- Martinez-Soto, Aner, Alejandra Calabi-Floody, Gonzalo Valdes-Vidal, Andrea Hucke, and Camila Martinez-Toledo. 2023. "Life Cycle Assessment of Natural Zeolite-Based Warm Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement." *Sustainability* 15 (2): 1003.
- Mazumder, Mithil, Vedaraman Sriraman, Hyun Hwan Kim, and Soon Jae Lee. 2016. "Quantifying the Environmental Burdens of the Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements and the Production of Warm Mix Asphalt (WMA)." *International Journal of Pavement Research and Technology* 9 (3): 190–201.
- Mckone, T. E., and E G Hertwich. 2001. "LBNL-48254 The Human Toxicity Potential and a Strategy for Evaluating Model Performance in Life-Cycle Impact Assessment." Ernest Orolado Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley
- McNally, T., and P. Pötschke. 2011. *Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterisation*. Woodhead Pub.
- Milad, Abdalrhman, Ali Mohammed Babalghaith, Abdulnaser M. Al-Sabaeei, Anmar Dulaimi, Abdualmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, and Nur Izzi Md Yusoff. 2022. "A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 22(11).
- 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.
- Movilla-Quesada, Diana, Manuel Lagos-Varas, Aitor C. Raposeiras, Osvaldo Muñoz-Cáceres, Valerio C. Andrés-Valeri, and Carla Aguilar-Vidal. 2021. "Analysis of Greenhouse Gas Emissions and the Environmental Impact of the Production of Asphalt Mixes Modified with Recycled Materials." *Sustainability (Switzerland)* 13 (14).
- Nizamuddin, Sabzoi, Yeong Jia Boom, and Filippo Giustozzi. 2021. "Sustainable Polymers from Recycled Waste Plastics and Their Virgin Counterparts as Bitumen Modifiers: A Comprehensive Review." *Polymers* 13(19):3242.
- Okhotnikova, E. S., I. N. Frolov, Yu M. Ganeeva, A. A. Firsin, and T. N. Yusupova. 2019. "Rheological Behavior of Recycled Polyethylene Modified Bitumens." *Petroleum Science and Technology* 37 (10): 1136–1142.
- Oreto, Cristina, Francesca Russo, Rosa Veropalumbo, Nunzio Viscione, Salvatore Antonio Biancardo, and Gianluca Dell'acqua. 2021. "Life Cycle Assessment of Sustainable Asphalt Pavement Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers." *Materials* 14 (14).
- Santos, João, Sarah Bressi, Veronique Cerezo, Michel Dauvergne, and Davide Lo Presti. 2018. "Life Cycle Assessment of Low Temperature Asphalt Mixtures for Road Pavement Surfaces: A Comparative Analysis" 138: 283–297.
- Sarasputri, Dwi Ajeng. 2022. "Life Cycle Assessment Perkerasan Jalan Beraspal Dengan Reclaimed Asphalt Pavement Di Ruas Jalan Nasional Provinsi Jawa Barat." *Jurnal Jalan-Jembatan* 39 (2): 137–149.
- Sharma, Sonu, Sitansh Sharma, and Niraj Upadhyay. 2019. "Composition Based Physicochemical Analysis of Modified Bitumen by HDPE/LDPE." *Oriental Journal of Chemistry* 35 (3): 1167–73.
- Silva, José de Arimateia Almeida e., John Kennedy Guedes Rodrigues, Maria Wilma de Carvalho, Lêda Christiane de Figueredo Lopes Lucena, and Erinaldo Hilário Cavalcante. 2018. "Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Using Polymer-Micronized PET-Modified Binder." *Road Materials and Pavement Design* 19 (4): 1001–1009.
- Lima, Mayara Sarisariyama Siverio, Christina Makoundou, Cesare Sangiorgi, and Florian Gschösser. 2022. "Life Cycle Assessment of Innovative Asphalt Mixtures Made with Crumb Rubber for Impact-Absorbing Pavements." *Sustainability (Switzerland)* 14 (22).
- Sousa, Fabiula Danielli Bastos de. 2017. "Devulcanization of Elastomers and Applications." In *Elastomers*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68585>.
- Suksiripattanapong, Cherdsak, Khanet Uraikhot, Sermsak Tiyasangthong, Nattiya Wonglakorn, Wisitsak Tabyang, Sajjakaj Jomnonkwao, and Chayakrit Phetchuay. 2022. "Performance of Asphalt Concrete Pavement Reinforced with High-Density Polyethylene Plastic Waste." *Infrastructures* 7 (5).
- Tang, Ning, Kai kai Yang, Yazan Alrefaei, Jian Guo Dai, Li Mei Wu, and Qing Wang. 2020. "Reduce VOCs and PM Emissions of Warm-Mix Asphalt Using Geopolymer Additives." *Construction and Building Materials* 244 (May).

- Tarannum, Nafisa, Banhee Shikha Roy Brishti, Sadia Siddika Dima, and Kawnish Kirtania. 2021. "Life-Cycle Impact Assessment of Fossil Power Plants with and without Co2 Capture Evaluating the Possibility of Co2 Utilization." *Chemical Engineering Research Bulletin*, June, 88–93.
- Tiwary, Abhishek, and Jeremy Colls. 2010. *Air Pollution: Measurement, Modelling and Mitigation, Third Edition*. 3rd ed.
- Vega, Daniela L., Martinez A. Gilberto, and Joao M.O. Dos Santos. 2019. "Life Cycle Assessment of Warm Mix Asphalt with Recycled Concrete Aggregate." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 603. Institute of Physics Publishing.
- Wirahadikusumah, Reini D., and Hengki Putra Sahana. 2012. "Estimasi Konsumsi Energi Dan Emisi Gas Rumah Kaca Pekerjaan Pengaspalan Jalan." *Jurnal Teknik Sipil* 19 (1): 25–36.
- Xiu, Meng, Xianyu Wang, Lidia Morawska, David Pass, Andrew Beecroft, Jochen F. Mueller, and Phong Thai. 2020. "Emissions of Particulate Matters, Volatile Organic Compounds and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Warm and Hot Asphalt Mixes." *Journal of Cleaner Production* 275 (December).