

Studi Komparasi Dampak Lingkungan Produksi Campuran Aspal Hangat Modifikasi Polimer EVA dengan Campuran Aspal Panas Skala Laboratorium Menggunakan *Life Cycle Assessment (LCA)*

Christian Gerald Daniel ^{1*}, Khairina Anindya Canny ², Fadhil Muhammad Firdaus ³, Darren B. Iskandar ¹

¹ *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan, Jl. MH. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang, Banten, Indonesia 15811*

² *Smart Construction and Civil Engineering, Calvin Institute of Technology, Jakarta, Indonesia*

³ *Air Quality Research Analyst at World Resources Institute, Jakarta, Indonesia*

Abstrak

Studi ini membandingkan dampak lingkungan dari produksi campuran aspal hangat (Warm Mix Asphalt – WMA) dimodifikasi polimer EVA dengan dosis 5% berat bitumen melalui metode pencampuran kering (dry mixing) dengan campuran aspal panas (Hot Mix Asphalt – HMA) standar pada skala laboratorium menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA) dengan lingkup dari akuisisi bahan baku hingga produksi di laboratorium aspal Universitas Pelita Harapan. Kajian ini menggabungkan database CML-IA Midpoint dan Eurobitume serta pengukuran emisi di laboratorium. Hasil pengukuran menunjukkan penurunan pada suhu produksi WMA menghasilkan emisi CO₂ dan Volatile Organic Compound (VOC) yang lebih rendah sebesar 41.82% - 46.96% dan 5.3% - 7.98% dibandingkan HMA. Emisi formaldehida pada produksi WMA menurun hingga 77-79%, maupun Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) sebesar 74.95% - 81.42%, 77.31% - 85.11%, dan 81.96% - 89.19%. Analisis LCA menunjukkan dampak Global Warming Potential WMA modifikasi mengalami kenaikan 3.66% dan 5.95% dari HMA akibat penggunaan bahan tambah, tetapi menurun dari segi Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential sebesar 12.96% - 14.12%, serta Human Toxicity dan Photochemical Oxidation Potential sebesar 1.73%. Kesimpulan yang didapatkan yakni penggunaan EVA untuk modifikasi WMA pada dosis 5% dan 6% menghasilkan pengurangan dampak sebesar 3.48% dan 1.43% dibandingkan HMA dengan sifat mekanis sesuai standar Bina Marga 2018.

Kata kunci: *Life Cycle Assessment (LCA); Cradle-to-Gate; campuran aspal hangat; aspal modifikasi polimer; EVA*

Abstract

[Title: Lab-Scale Comparison of Environmental Life-Cycle Impact Between Polymer-Modified Warm Mix and Hot Mix Asphalt] *This study compared the environmental impact of warm mix asphalt (WMA) modified by EVA through the dry mixing method to the standard hot mix asphalt (HMA) on lab scale utilizing Life Cycle Assessment (LCA) with the scope of cradle-to-gate from resource mining to the specimen production in the Pavement laboratory in UPH. This study combines the CML-IA Midpoint and Eurobitume databases with direct emission measurement for LCA inventory. The measurement illustrated the impact of WMA's lower production temperature in decreasing CO₂ and Volatile Organic Compound (VOC) by 41.82% - 46.96% and 5.3% - 7.98% compared to HMA. Meanwhile, the amount of formaldehyde from WMA production was 77-79%, and Particulate Matters ((PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) were 74.95% - 81.42%, 77.31% - 85.11%, and 81.96% - 89.19% lower than HMA, respectively. LCA analysis illustrated an increased Global*

Warming Potential from WMA production by 3.66% and 5.95% due to the added materials; conversely, the Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential was reduced by 12.96% - 14.12%, and Human Toxicity

^{*}) Penulis Korespondensi.

E-mail: christian.geraldaniel@gmail.com

and Photochemical Oxidation Potential by 1.73%. Overall, the production of EVA-modified WMA resulted in lower environmental impacts than HMA by 3.48% dan 1.43% on average, with the specimen's technical properties complying with Bina Marga 2018 norm..

Keywords: Life Cycle Assessment; Cradle-to-Gate; Warm Mix Asphalt; Polymer Modified Asphalt; EVA

1. Pendahuluan

Campuran aspal hangat (*Warm Mix Asphalt* - WMA) merupakan sebuah metode produksi campuran aspal pada suhu yang lebih rendah dari campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt* - HMA) konvensional. Pada standar nasional Indonesia untuk perkerasan jalan aspal yang dikenal dengan nama standar Bina Marga 2018, perbedaan temperatur produksi ini ditetapkan sebesar 30°C dimana WMA diproduksi pada suhu 130°C (Dirjen Bina Marga, 2018). WMA memiliki sifat mekanis yang lebih rendah dibandingkan dengan HMA standar, seperti dalam hal ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*), walaupun beberapa tipe aditif tertentu dapat membantu mengurangi perbedaan tersebut (Nur Naqibah Kamarudin et al., 2018; Zhao et al., 2012). Walaupun penelitian lain menunjukkan bahwa WMA menghasilkan nilai ketahanan terhadap leleh yang relatif setara dengan HMA (Piccone et al., 2020a; Sukhija & Saboo, 2021), tetapi tingkat adhesi yang rendah akibat adanya kandungan air dalam campuran menyebabkan WMA memiliki ketahanan terhadap air yang lebih rendah (Albayati et al., 2018; Rahman et al., 2021). Selain itu, campuran WMA juga diketahui memiliki nilai kuat Tarik hingga 25% lebih rendah serta nilai deformasi permanen hingga 180% lebih besar dari HMA (Piccone et al., 2020b). Oleh karena itu, beberapa bahan tambah telah diaplikasikan lebih jauh untuk meningkatkan sifat mekanis WMA, seperti karet dan polimer lain sebagai bahan modifikasi bitumen (Giustozzi et al., 2015; Lushing et al., 2020; H. Wang et al., 2018, 2020), maupun penggunaan fiber pada skala campuran aspal (Apostolidis et al., 2019, 2020; Daniel et al., 2021).

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menekankan keunggulan WMA dibandingkan dengan HMA, seperti pengurangan dampak beberapa emisi hingga rata-rata 50%, penghematan konsumsi bahan bakar dan energi hingga mencapai 45%, serta bertambahnya ruang untuk melakukan pemadatan lapangan dan berkurangnya risiko kesehatan bagi pelaksana pekerjaan (Rubio et al., 2012; Zaumanis, 2014a, 2014b). Penelitian di Cina menggunakan metode *Life-Cycle Assessment* (LCA) untuk membandingkan dampak lingkungan dari penggunaan WMA dengan HMA, dan didapatkan bahwa WMA menghasilkan 25-30% *Global Warming Potential* (GWP), *Acidification potential*, dan penggunaan bahan bakar fosil lebih kecil (Mazumder et al., 2016). LCA sendiri telah sering digunakan sebagai metode untuk menghitung dampak

lingkungan dari suatu produk selama masa hidupnya, dan aplikasinya pada bidang teknik jalan dengan campuran aspal telah banyak dilakukan sebelumnya (Fistcar, n.d.; Mukherjee, 2016a; Oktopianto & Hidayat, n.d.; Oretto et al., 2021; Park et al., 2020; Santos et al., 2018; Wildnauer et al., 2019).

Penggunaan metode LCA untuk menghitung dampak lingkungan dari produksi aspal saat ini kebanyakan menggunakan *database* dampak yang telah ada, seperti penelitian yang menggunakan data dari Eropa dan Amerika Serikat, maupun penelitian di Indonesia yang juga menggunakan data dampak dari Eropa (Espinoza et al., 2019; Mukherjee, 2016b; Sarasputri, 2022; Sollazzo et al., 2020). Penelitian yang mencoba menggambarkan dampak lingkungan dari penggunaan WMA sebelumnya menggunakan data yang berasal dari Eropa (Araujo et al., 2022; Vega et al., 2019; Vidal et al., 2013) serta Asia Tengah (Milad et al., 2022a), yang mana dibuat berdasarkan data dari *Ecoinvent* serta pengukuran pada lokasi studi tersebut serta menggunakan teknologi aspal daur ulang. Penelitian yang mencoba menganalisis dampak lingkungan dari konstruksi jalan aspal di Indonesia selama ini mencoba menganalisis dampak lingkungan dari pekerjaan pengaspalan jalan maupun perbandingan aplikasi konstruksi jalan aspal dan beton yang mengambil data berdasarkan panduan dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (Fistcar, 2020; Wirahadikusumah & Sahana, 2012). Selain itu, studi LCA mengenai aspal modifikasi polimer pun saat ini kebanyakan berfokus pada pencampuran langsung ke bitumen, yang disebut dengan metode campuran basah (*wet mix*), seperti penggunaan polimer plastik daur ulang serta lignin (Khater et al., 2021; Masri et al., 2022; Salehi et al., 2022). Metode pencampuran basah (*wet mix*) sendiri merupakan metode untuk memodifikasi bitumen sebagai bahan pengikat campuran menggunakan polimer, dimana polimer juga dapat dicampurkan langsung pada saat pencampuran bitumen dengan agregat, yang dinamakan metode pencampuran kering (*dry mix*) (Brasileiro et al., 2019; McNally & Pötschke, 2011).

Saat ini belum ada penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan polimer berbentuk granular untuk memodifikasi campuran aspal dengan metode campuran kering. Penelitian terkait yang telah dibahas sebelumnya pun menggunakan metode kajian dari data sekunder melalui *database* yang disediakan, maupun hanya mengevaluasi beberapa emisi yang dihasilkan oleh konstruksi jalan



Gambar 1. (a) Bitumen 60/70 Shell, (b) agregat dan (c) polimer EVA untuk WMA

aspal tanpa menggunakan metode analisis LCA. Oleh sebab itu, studi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan dari produksi WMA yang dimodifikasi polimer *Ethylene-Vinyl Acetate* (EVA) berbentuk granular menggunakan metode campuran kering (*dry mix*) dengan HMA standar tanpa modifikasi pada skala laboratorium. Selain dampak lingkungan, beberapa sifat mekanis akan diuji dan dibandingkan dengan literatur terkait penelitian ini sebelumnya untuk memvalidasi performa dari kedua tipe campuran tersebut.

2. Metode Penelitian

2.1 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, seperti terlihat pada Gambar 1. 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 HMA maupun WMA. Pertama-tama, semua material campuran WMA dipanaskan pada suhu 130°C selama 45 menit, kecuali bitumen yang dipanaskan dahulu pada 160°C sebelum dicampurkan dengan zeolite sintetis dan kemudian ditaruh pada kondisi oven 130°C bersama material lainnya. Semua material lalu dicampurkan didalam mixer *planetary* untuk menjaga tingkat pencampuran sampel agar dapat merata ketika agregat dicampurkan dengan polimer dan kemudian dengan bitumen modifikasi

zeolite. Polimer yang digunakan untuk modifikasi campuran WMA dalam penelitian ini berbahan dasar EVA, yang terlihat pada Gambar 6, dengan dosis sebesar 5% dan 6% dari berat bitumen, sedangkan zeolite yang digunakan pada produksi WMA sebesar 1% 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 (Daniel et al., 2022; Montanelli & srl, 2013). Polimer EVA yang digunakan memiliki nama dagang Superplast produksi Iterchemica, dengan spesifikasi teknis ditampilkan pada Tabel 1 berdasarkan data dari manufaktur.

Campuran yang terbentuk kemudian dipadatkan melalui alat pemadat Marshall dengan jumlah tumbukan 75 kali per sisi (total 150 kali). Produksi sampel HMA mengikuti langkah kerja yang sama, akan tetapi terdapat perlakuan yang berbeda pada agregat serta bitumen dipanaskan dalam suhu 160°C tanpa adanya penggunaan zeolite maupun polimer EVA. Spesifikasi material dan *mix design* akan ditampilkan pada segmen berikutnya.

Pengukuran sifat volumetrik dan mekanis

Selain pengukuran dampak lingkungan dan analisis menggunakan metode LCA, sampel aspal yang diproduksi juga diobservasi terhadap sifat volumetrik dan mekanisnya. 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*). Perhitungan sifat-sifat volumetrik ini dilakukan menggunakan persamaan (1) hingga (4).

Tabel 1. Sifat fisik dan mekanis polimer EVA Superplast (Iterchemica, n.d.-a, n.d.-b)

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

$$G_{mb} = \frac{W_{kering}}{W_{ssd} \cdot W_{terendam}} \quad (1)$$

$$VIM (\%) = 100 \left(\frac{G_{mm} \times G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (2)$$

$$VMA (\%) = 100 \left(\frac{G_{mb} \times P_{agg}}{G_{agg}} \right) \quad (3)$$

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_{agg}}{G_{agg}} + \frac{P_{bit}}{G_{bit}}} \quad (4)$$

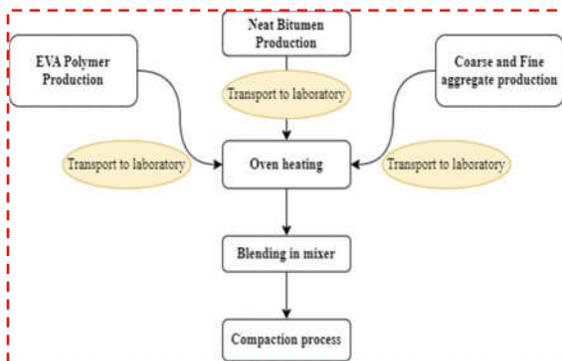
G_{mb} adalah berat jenis curah (*bulk*) campuran, W_{kering} adalah berat sampel dalam kondisi kering, W_{ssd} adalah berat sampel dalam kondisi kering permukaan, $W_{terendam}$ adalah berat sampel dalam posisi terendam air, G_{mm} adalah berat jenis maksimum campuran, P_{agg} adalah persentase berat agregat dalam campuran, G_{agg} adalah berat jenis agregat rata-rata, P_{bit} adalah kadar bitumen dalam campuran, dan G_{bit} adalah berat jenis bitumen.

Sifat mekanis campuran aspal yang diproduksi didapatkan dari pengujian Marshall, yakni stabilitas yang menandakan beban maksimum yang dapat dipikul spesimen, kelelahan (*flow*) yaitu deformasi yang tercatat pada saat keruntuhan sampel, serta *Marshall Quotient* (MQ) yang merupakan rasio dari stabilitas dan kelelahan. Semua hal ini bertujuan untuk membandingkan performa dari WMA yang dimodifikasi polimer dan HMA standar.

1.2 Life-Cycle Assessment (LCA)

1.2.1 Penentuan Tujuan dan Cakupan (Scope)

Life Cycle Assessment (LCA) adalah suatu metode yang lazim digunakan untuk mengukur dampak yang dihasilkan dari suatu produk selama masa daur hidupnya. Perkembangan LCA di Indonesia sendiri dimulai dari penerbitan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang dibuat berdasarkan ISO, yaitu SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017. Menurut pedoman teknis yang dibuat oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), terdapat 7 prinsip dasar penggunaan LCA, yakni perspektif daur hidup, fokus lingkungan, pendekatan relatif dan unit fungsional, pendekatan iteratif, transparansi, bersifat komprehensif, dan prioritas pendekatan ilmiah (Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan, 2021).

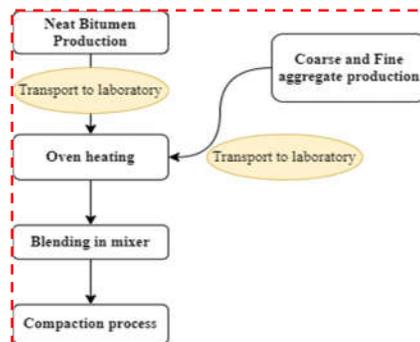


Gambar 2. Batasan system LCA untuk analisis produksi WMA modifikasi EVA

Dalam penentuan ruang lingkup LCA, setiap proses dalam daur hidup yang ditinjau diberikan istilah *Gate*. Terdapat beberapa tipe ruang lingkup dari suatu kajian LCA. Yang pertama adalah *cradle-to-grave*, yaitu kajian yang meneliti dampak yang dihasilkan mulai dari tahap akuisisi material bahan baku hingga tahap akhir hidup suatu produk, yaitu pemusnahan. Berikutnya adalah *cradle-to-cradle*, yaitu analisis yang meninjau daur hidup suatu produk dari akuisisi bahan baku hingga proses daur ulang produk yang dihasilkan tersebut menjadi material baru (*recycling*). Yang terakhir adalah *cradle-to-gate*, yaitu tipe analisis LCA yang meninjau daur hidup suatu produk dari tahap paling awal (akuisisi material) hingga suatu tahap hidup yang dibatasi (produk selesai difabrikasi / tahap penggunaan produk / dll). Sesuai dengan tujuan dari studi ini untuk mengukur dampak lingkungan dari aplikasi produksi dua macam campuran aspal, yakni campuran aspal panas (HMA) dan hangat (WMA), maka proses perbandingan ini dilakukan dalam cakupan *Cradle-to-Gate*, yang dimulai dari proses produksi material penyusun campuran (bitumen, agregat, serta zeolite dan polimer EVA untuk WMA) hingga proses pembuatan spesimen di laboratorium. Adapun polimer EVA yang digunakan untuk WMA menggunakan dosis sebesar 5 dan 6% dari berat bitumen, dimana penggunaan polimer dengan dosis ini diharapkan untuk menghasilkan WMA dengan sifat mekanis setara dengan HMA, sehingga perbandingan dampak lingkungan dapat dilakukan dengan lebih ekuivalen. Batasan sistem yang digunakan di dalam kajian ini untuk penentuan dampak lingkungan ditampilkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

1.2.2 Metode akuisisi data dampak lingkungan di laboratorium

Untuk keperluan analisis inventori, kajian LCA dapat dibuat menggunakan *database* yang tersedia secara global baik yang gratis maupun berbayar, serta yang dimasukkan dalam aplikasi analisis LCA yang beredar, seperti SimaPro atau OpenLCA. Contoh data inventori yang tersedia di SimaPro seperti Ecoinvent dan US-LCI.



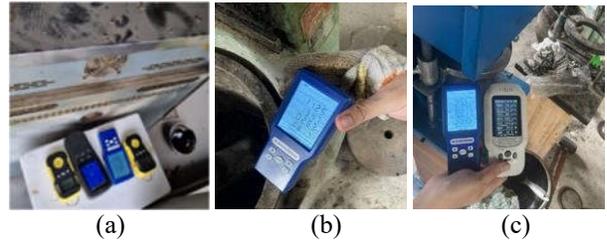
Gambar 3. Batasan system LCA untuk analisis produksi HMA



Gambar 4. Instrument alat IAQ yang digunakan

Selain menggunakan data tersebut, inventori untuk pengukuran dampak dapat dihasilkan dari pengukuran langsung di lapangan, yang dapat dilakukan dengan dua metode. Metode pertama adalah dengan mengukur konsentrasi polutan pada udara ambien, yang dikenal dengan metode *Ambient Air Quality Monitoring* (AQM). Pengukuran *Ambient Air* dilakukan untuk melihat pengaruh polutan yang tercampur dengan udara sekitar. Pengukuran *Ambient Air* ditujukan untuk mengetahui komposisi udara di lokasi yang sama dengan kondisi sebelum munculnya sumber dominan disekitar (atau biasa disebut *background concentration*) dan perbandingan saat munculnya sumber polusi (Tiwary & Colls, 2010), sementara metode lainnya dapat dilakukan juga dengan cara mengukur pada sumber emisi langsung pada system tertutup dikenal dengan nama *Continuous Emission Monitoring* (CEM). CEM dilakukan untuk mengetahui kadar murni polusi yang diemisikan sebelum bercampur dengan gas lainnya di udara ambien, hanya saja metode ini memiliki biaya yang lebih tinggi karena konfigurasi uji yang lebih rumit (Hamilton & Requate, 2012; Jahnke, 2022).

Fase studi ini dilakukan melalui dua tahap. Pada fase pertama, pengukuran nilai emisi dilakukan menggunakan alat *Indoor Air Quality* (IAQ) merk *Dienmern* tipe 502-03, yang ditunjukkan pada Gambar 4 dengan jangkauan pengukuran hingga 100 meter dan ketepatan pengukuran tiap 1.5 detik, pada seluruh proses produksi di laboratorium mulai dari pemanasan material



Gambar 5. Pengukuran nilai emisi pada (a) oven pemanas, (b) mixer dan (c) alat kompaksi Marshall

campuran, pencampuran di mixer, serta pemadatan di alat kompaksi. Sensor yang digunakan untuk mengukur PM berupa *laser scattering* untuk pengukuran formaldehida menggunakan *electrochemistry sensor*, sedangkan sensor yang digunakan untuk mengukur VOC berupa *semiconductor sensor*.

Alat IAQ diletakkan tepat di sebelah celah permukaan bidang alat yang sedang digunakan dalam proses produksi agar emisi yang keluar bisa tercatat seakurat mungkin, seperti yang terlihat pada Gambar 5. Beberapa jenis emisi yang dapat diukur antara lain karbon dioksida (CO_2), formaldehida (HCHO), *Volatile Organic Compound* (VOC), dan *Particulate Matter* (PM) dalam tiga ukuran: PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 . Kegiatan pengukuran emisi tersebut dilakukan secara berkala, dimana pencatatan tiap emisi pada setiap fase produksi spesimen dilakukan di posisi awal sebelum kegiatan dimulai dan posisi akhir setelah pengerjaan selesai untuk mendapatkan tingkat kenaikan emisi akibat pekerjaan tersebut, dan diberikan jeda selama 10 menit setelah pengukuran satu sampel ke permulaan sampel berikutnya untuk memberikan jeda bagi semua instrument untuk kembali ke posisi kalibrasi awal sehingga pengukuran emisi pada setiap fase dapat menghasilkan data yang tidak mengalami interferensi dari fase pengukuran sebelumnya. Pengukuran ini dilakukan pada laboratorium yang telah dibatasi akses keluar masuk sedemikian rupa

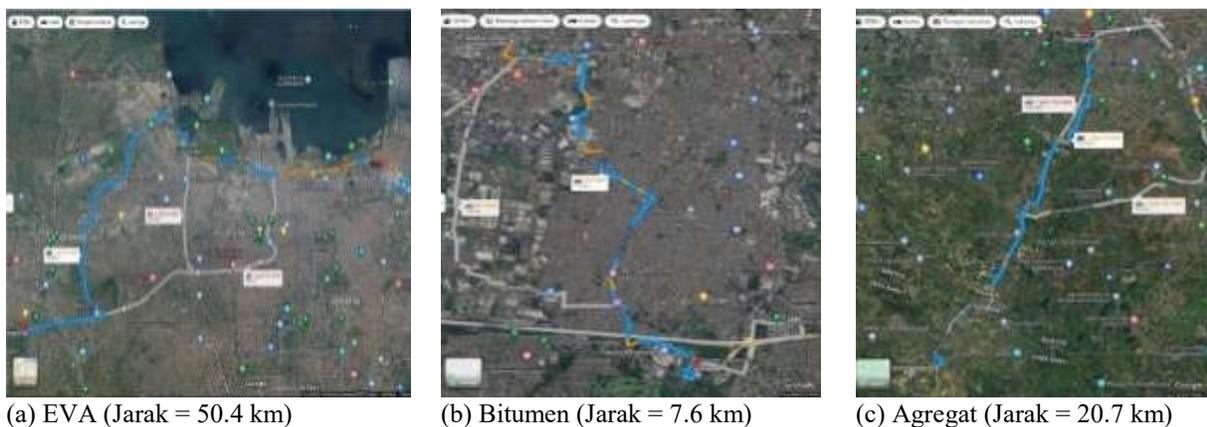


(a)



(b)

Gambar 6. (a)Interior ruangan dan (b) eksterior laboratorium aspal UPH



Gambar 7. Transportasi (kiri) polimer EVA, (tengah) bitumen dan (kanan) agregat ke UPH

sehingga pengaruh emisi dari luar yang dapat mempengaruhi sirkulasi emisi secara signifikan dapat diabaikan, tetapi disisakan celah yang cukup untuk terjadi sirkulasi emisi secara alami sehingga perubahan tingkat emisi yang tercatat dapat dijaga semaksimal mungkin. Situasi laboratorium tersebut ditampilkan pada Gambar 6. Sistem ini dibuat semirip mungkin dengan konfigurasi pengukuran emisi CEM, dimana alat pengukur diletakkan sedekat mungkin dengan sumber emisi untuk mendapatkan hasil yang akurat dan meminimalisir pengaruh kondisi ambien.

Jumlah sampel aspal yang dibuat adalah 5 sampel per jenis, sehingga total pengukuran berjumlah 15 sampel aspal. Detail jarak serta rute transportasi bahan baku campuran aspal ke lokasi laboratorium UPH dapat dilihat di Gambar 7, yang diukur menggunakan aplikasi Google Maps.

Studi lain yang mencoba mengukur tingkat emisi yang ditimbulkan oleh produksi campuran aspal telah dilakukan dengan melakukan pencatatan kandungan zat polutan pada sampel tanah yang terletak di sekitar lokasi *asphalt mixing plant* (AMP) yang dilakukan di Nigeria. Studi lain yang serupa lebih banyak menekankan pada penggunaan data yang terdapat pada database yang tersedia, baik studi yang dilakukan di Indonesia yang menggabungkan hasil database dan survei kualitatif pada warga di sekitar lokasi AMP maupun di Slovakia yang menggunakan *database* secara keseluruhan, dimana salah satu sumber yang sering dijadikan rujukan berasal dari Amerika Serikat (Florkova et al., 2021; Rilwani & Agbanure, 2010; Romadhon et al., 2020b, 2020a; Tacoma-Pierce, 2020; US EPA, 2000). Laporan dari *US Environmental Protection Agency* (US EPA) serta *European Environment Agency* (EEA) sendiri mengemukakan metode kuantifikasi yang berdasarkan pada laju produksi yang dikalikan dengan faktor emisi yang telah dibuat secara teoritis (European Environment Agency, 2016; US EPA, 2000). Metode lain yang disarankan seperti menggunakan *sampling* pun diarahkan

dengan menggunakan CEM yang sifatnya mahal dan pelaksanaannya cukup rumit (National Pollutant Inventory Australia, 1999; SICK Sensor Intelligence, 2021). Satu penelitian yang secara khusus membahas mengenai pengukuran emisi dari sistem produksi campuran aspal pada skala laboratorium di Prancis menggunakan sistem tertutup CEM untuk mengukur fluktuasi emisi CO₂, SO₂, NO_x dan *Gaseous Organic Compounds* (GOC) akibat produksi campuran aspal panas secara eksklusif (Jullien et al., 2010).

Hasil data inventori tersebut kemudian akan dianalisis untuk membuat penilaian dampak menggunakan *database* kategori dampak. *Database* kategori dampak yang tersedia umumnya terbagi atas dua level, yaitu *midpoint* dan *endpoint*. Pada tipe inventori *midpoint*, setiap kategori dampak yang dianalisis akan merujuk pada satu fenomena spesifik / level terendah, sebagai contoh dampak pemanasan global (*Global Warming Potential – GWP*) yang dikeluarkan oleh IPCC yang bisa didapatkan dengan gratis. Beberapa contoh kategori dampak yang ada dalam semua database ini seperti pemanasan global (*Global Warming Potential – GWP*), *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential* (FAETP), *Human Toxicity Potential* (HTP), dan *Photochemical Oxidation Potential* (POP) yang ditinjau dalam studi ini. GWP adalah suatu kategori dampak yang menggambarkan efek pemanasan global akibat gas rumah kaca, yang dinyatakan dalam satuan referensi kg CO₂-eq (Ain et al., 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 & 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 (Hertwich et al., 2001; Lawrence et

Tabel 2. Tabel daftar faktor karakteristik untuk dampak yang dianalisis (Sumber: CML-IA Database, Midpoint)

Jenis emisi	GWP	FAETP	HTP	POP
CO ₂	1	0	0	0
VOC	0	0.000000837	1900	0.0092
HCHO	0	8.26	0.83	0
PM1	0	0	0.82	0
PM2.5	0	0	0.82	0
PM 10	0	0	0.82	0

al., 2001). POP adalah suatu kategori dampak yang 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 C₂H₄-eq (Life Cycle Association of New Zealand, 2019; Tarannum et al., 2021). Kategori data *endpoint* biasanya merujuk pada jenis dampak dengan level lebih tinggi dari kategori *midpoint*, yang berarti akan menjadi kategori yang lebih umum dan menyangkut area proteksi tertentu, seperti perlindungan terhadap kesehatan manusia, ekosistem, dan sumber daya alam (Cristobal-Garcia et al., 2016).

Hasil pengukuran yang dilakukan pada studi ini kemudian dimasukkan ke dalam analisis LCA dengan menambahkan data aspek daur hidup komponen campuran aspal yang ada, dimulai dari proses produksi bahan dasar yang ada hingga transportasi menuju laboratorium UPH. Aspek transportasi material serta produksi agregat disesuaikan dengan *database Ecoinvent*, sedangkan untuk produksi bahan bitumen menggunakan data dari Eurobitume. Total emisi yang dikeluarkan kemudian dikalikan dengan faktor karakteristik (*characterization factor – CF*) yang diambil dari *CML-IA*

Midpoint Category sesuai dengan Persamaan (5). Empat faktor dampak lingkungan yang menjadi luaran kajian ini yaitu *Global Warming Potential (GWP)*, *Human and Freshwater Ecotoxicity Potential (HTP and FAETP)*, dan *Photochemical Oxidation Potential (POP)* dengan faktor karakteristik dapat dilihat pada Tabel 2.

$$Impact\ Category = \sum Output \times CF \tag{5}$$

Hasil kajian ini kemudian dapat diinterpretasikan untuk mencari titik-titik kritis dalam daur hidup suatu produk untuk dapat dilakukan perbaikan serta membandingkan dua produk serupa untuk melihat alternatif dengan dampak yang lebih kecil (JRC Science Hub, 2016).

3. Hasil dan Pembahasan

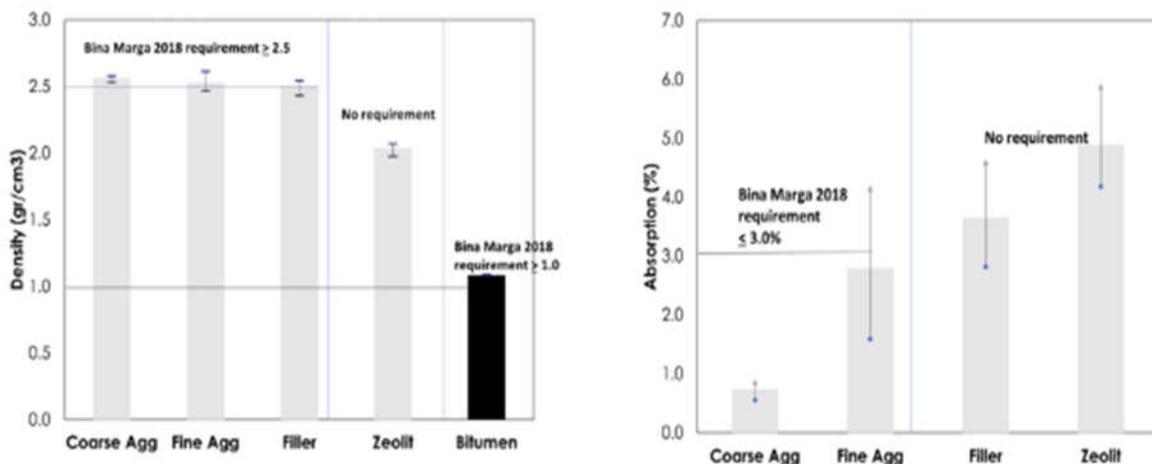
3.1 Pengujian Bahan Baku Campuran Aspal

Hasil pengujian sifat-sifat volumetrik dan reologi material komponen campuran aspal pada studi ini disajikan pada Gambar 8 dan Tabel 3.

Dapat dilihat di Tabel 3 bahwa material yang digunakan telah memenuhi persyaratan dalam Standar Bina Marga 2018, dengan gradasi campuran aspal yang disajikan pada Gambar 9 juga berdasarkan kriteria pada Standar Bina Marga 2018. Zeolite yang digunakan pada penelitian ini memiliki tipe sintesis dan bergradasi halus sesuai standar Bina Marga 2018 agar dapat dicampurkan secara homogen pada bitumen panas, dengan kadar sebesar 1% dari berat bitumen.

1.3 Pengujian Volumetrik dan Mekanis

Pengujian sifat volumetrik dan mekanis campuran aspal yang diproduksi, dilakukan untuk membandingkan performa antara HMA standar dengan WMA yang



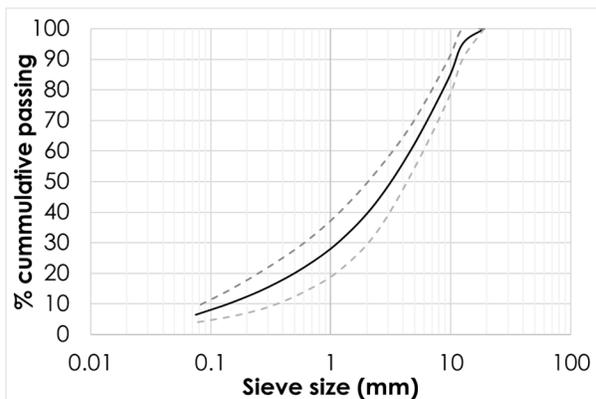
Gambar 8. (Kiri) Berat jenis dan (kanan) penyerapan material komponen campuran aspal

Tabel 3. Sifat reologi material bitumen

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

ditambahkan polimer. Hasil observasi dapat dilihat pada Gambar 10.

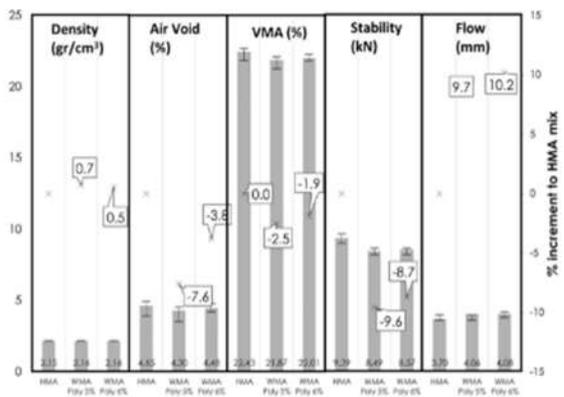
Gambar 14 menggambarkan dengan jelas bahwa penambahan polimer tidak mengubah karakteristik volumetrik campuran aspal hangat, yakni berat jenis, rongga udara, dan VMA secara signifikan, dengan selisih hanya sebesar <0.7%, <7.6%, dan <2.5%. Dapat dilihat juga bahwa penambahan polimer dapat meningkatkan nilai stabilitas WMA hingga hanya mencapai <10% lebih kecil dari HMA standar. Nilai stabilitas Marshall sampel WMA telah melebihi 8 kN (800 kg), yang berarti telah melewati standar Bina Marga 2018 untuk campuran HMA. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya oleh peneliti (Daniel et al., 2022), dimana terjadi peningkatan akibat penambahan polimer pada kekuatan WMA hingga mencapai 60%. Hal ini dapat disebabkan oleh interaksi antara polimer dengan bitumen serta matriks mortar pada campuran aspal hangat yang dapat meningkatkan kelekatan dan kekuatan sampel WMA tersebut. Kekakuan dan tingkat deformasi (*flow*) sampel WMA pun tidak berbeda signifikan dibandingkan HMA, dan kadar polimer yang berubah tidak secara drastis mengubah kekakuan serta deformasi dari sampel WMA yang ada. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa aplikasi polimer EVA pada campuran WMA menghasilkan sampel yang memiliki performa relatif ekuivalen dengan HMA standar, sehingga dapat menjadi alternatif untuk aplikasi lapangan lebih lanjut.



Gambar 9. Gradasi campuran aspal rencana berdasarkan Bina Marga 2018

1.4 Hasil pengukuran emisi laboratorium

Data hasil pengukuran emisi pada proses produksi sampel di laboratorium UPH disajikan pada Gambar 11 dan Gambar 12. Gambar 11 mencatatkan hasil emisi karbon dioksida (CO₂) dan *Volatile Organic Compound* (VOC) yang dominan timbul dari proses pemanasan material campuran dalam oven, dengan porsi terbesar pada produksi HMA hingga mencapai 75% dan 53% dari total emisi yang tercatat. Hal ini disebabkan oleh penggunaan suhu pemanasan yang tinggi hingga mencapai 160°C, sehingga proses pembakaran pada oven menimbulkan buangan gas CO₂ yang besar serta proses oksidasi pada bitumen saat pemanasan dapat menghasilkan senyawa VOC yang mudah terurai dan terlepas dari ikatannya. Dapat terlihat juga bahwa kedua emisi ini menjadi tipe emisi yang dominan tercatat pada saat pengujian, dengan selisih hingga mencapai 600% dan 191% lebih besar dari pencatatan emisi lain (formaldehida/ HCHO, dan *particulate matter*/ PM). Dari sini dapat terlihat bahwa penggunaan suhu pemanasan 30°C lebih rendah dalam aplikasi WMA modifikasi polimer menghasilkan total emisi CO₂ lebih rendah sebesar 46.96% untuk dosis polimer 5% dan 41.82% untuk dosis polimer 6%, serta emisi VOC yang tercatat pun lebih rendah sejauh 7.98% untuk WMA polimer 5% dan 5.3% untuk WMA polimer 6%. Total penurunan emisi CO₂ ini sesuai dengan hasil penelitian lapangan yang ada sebelumnya yang mencatat penurunan di kisaran 15 – 46%, sedangkan tingkat pencatatan reduksi emisi VOC cukup beragam dari 5 – 70%. (Chong et al., 2014; European Asphalt Pavement Association, 2014; Milad et al., 2022b; National Asphalt Pavement Association, 2012; Tang et al., 2020; Tutu & Tuffour, 2016a; M. Wang et al., 2021; Zaumanis, 2010). Adapun total emisi CO₂ yang dihasilkan pada proses produksi di laboratorium ini sebesar 79.5 - 149.8 gr / 6.986 kg sampel aspal dengan rasio emisi sebesar 1.14 – 2.14% dari total



Gambar 10. Parameter hasil pengujian volumetrik dan mekanis Marshall

massa produksi sampel, sedikit lebih besar dibandingkan rasio 0.98% dari hasil kajian di Perancis (Jullien et al., 2010), sedangkan emisi VOC yang dihasilkan sebesar 67.3 - 73 gram / 6.986 kg sampel aspal dengan rasio emisi 0.96 - 1.05% dari total massa sampel yang diproduksi, 600-1000 kali lebih besar dibandingkan hasil pengukuran langsung pada AMP pada kajian di Amerika Serikat serta Eropa (European Environment Agency, 2016; US EPA, 2000).

Meski aspek pemanasan pada oven tetap menjadi sumber emisi dominan pada kedua tipe campuran ini, tetapi penurunan suhu yang digunakan dapat menurunkan juga tingkat emisi CO₂ dari oven sebesar 48.34% untuk WMA modifikasi polimer 5% dan 41.96% untuk kadar polimer 6%, serta untuk VOC yakni sebesar 2.65% untuk WMA dengan dosis polimer 5%. Penurunan tingkat emisi CO₂ dan VOC pun tercatat cukup signifikan pada aspek pencampuran pada *mixer* hingga mencapai 38.27 - 40.18% serta 16.19 - 21.09%. Hal ini dapat disebabkan oleh proses pencampuran yang melibatkan campuran bersuhu tinggi dan mengeluarkan emisi CO₂ dan VOC yang lebih besar jika dibandingkan dengan campuran yang dibuat pada suhu yang lebih rendah (WMA).

Produksi campuran aspal panas menghasilkan emisi formaldehida (HCHO) sebesar 29.5 gr/ 6.986 kg dan *particulate matter* (PM₁₀, PM_{2.5}, dan PM₁) sebesar 7.7 gr, 6.5gr, dan 3.7 gr/ 6.986 kg campuran aspal. Hasil pengukuran emisi partikulat ditunjukkan pada Gambar 12. Di sisi lain, produksi campuran aspal hangat dengan menggunakan polimer 5 dan 6% menghasilkan dampak HCHO dan PM₁ - PM₁₀ sebesar 20.8 - 21.4 gr serta 3.2 - 7.3 gr/ 6.986 kg campuran aspal, dengan rasio emisi sebesar 0.3 - 0.42% untuk HCHO dan 0.05 - 0.11% untuk PM. Proses pencampuran pada *mixer* menyumbang kontribusi emisi formaldehida (HCHO) dan *particulate matter* (PM) terbanyak pada semua kasus dengan rentang 77 - 79% untuk HCHO, 74.95 - 81.42% untuk PM₁₀, 77.31 - 85.11% untuk PM_{2.5}, dan 81.96 - 89.19% untuk PM₁. Emisi pada oven menyumbang sebesar 6 - 20% dari total pencatatan, sedangkan fase kompaksi menyumbang sebesar 2 - 8% dari total emisi HCHO maupun PM. Jumlah emisi yang sangat besar pada fase pencampuran ini secara umum disebabkan oleh proses yang terjadi pada *mixer* yang sering menyebabkan debu-debu halus yang berterbangan selama pencampuran berlangsung. Selain itu, proses pencampuran material yang masih panas menyebabkan HCHO mudah terlepas ke udara. HCHO mulai terbentuk akibat proses pemanasan dan penggunaan sistem *blower* pada oven sehingga dapat menyebabkan material berbutir halus untuk terbang di dalam oven.

Dari dua macam emisi ini (HCHO dan PM) dapat terlihat bahwa system produksi WMA pada suhu yang lebih rendah dari HMA terbukti dapat menurunkan tingkat emisi tersebut. Emisi formaldehida (HCHO)

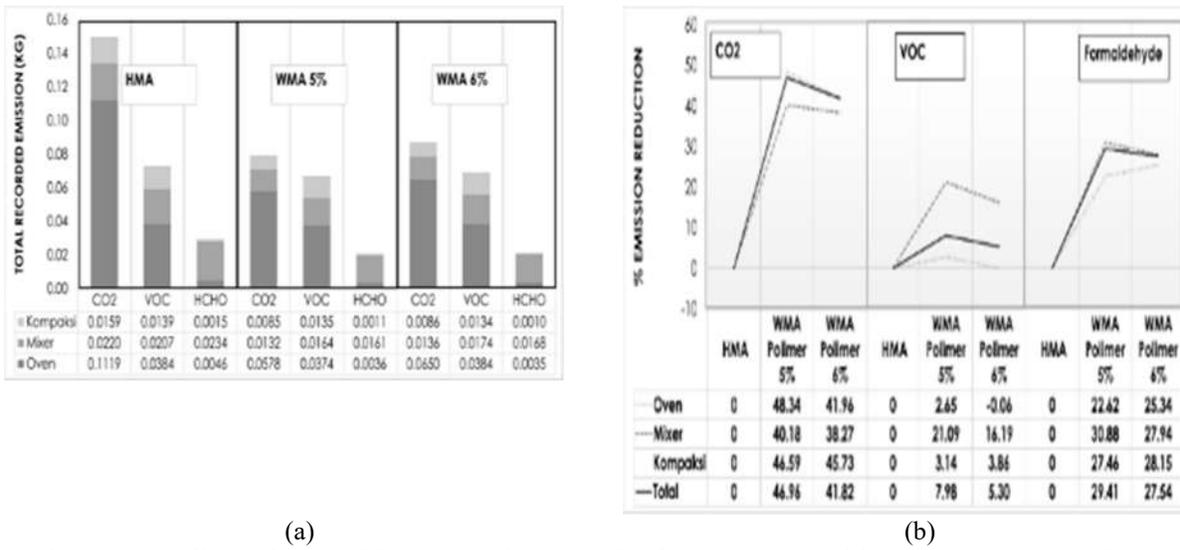
mengalami reduksi yang relatif merata pada setiap kategori produksi, mulai dari pemanasan di oven hingga pemadatan di Marshall *compactor*, dengan rentang 22.62% - 30.88% untuk produksi WMA modifikasi polimer 5% dan 25.34% - 28.15% untuk WMA modifikasi polimer 6%. Reduksi terbesar pada emisi PM₁₀ secara umum terjadi pada tahap pemanasan di oven dengan selisih sebesar 28.33 dan 38.33%, PM_{2.5} di 60.53% dan 33.33%, dan PM₁ di 34.21% dan 44.44% untuk WMA modifikasi polimer 5% dan 6%. Untuk tipe emisi berikutnya, produksi WMA polimer 6% menghasilkan reduksi PM_{2.5} dan PM₁ sebesar 41.67% dan 54.17% terhadap HMA, yang menjadikan nilai tersebut sebagai persentase terbesar pada kedua kategori tersebut. Hal ini dapat terlihat juga pada laporan serupa di Italia yang mencatat penurunan emisi debu dari rentang 25 - 55%, dan laporan lain mencatat penurunan hingga 100% (Martin et al., 2019; Mejías-Santiago & Osborn, 2014; Tang et al., 2020; Tutu & Tuffour, 2016b; Xiu et al., 2020).

Berdasarkan seluruh hasil pencatatan emisi di atas, dapat disimpulkan bahwa selisih 30°C pada proses produksi WMA yang dimodifikasi polimer dapat menurunkan emisi CO₂, VOC, HCHO dan PM sebesar rata-rata 18.24% untuk penggunaan polimer 5% dan 18.17% untuk penggunaan polimer 6%, dibandingkan dengan HMA standar tanpa menggunakan polimer.

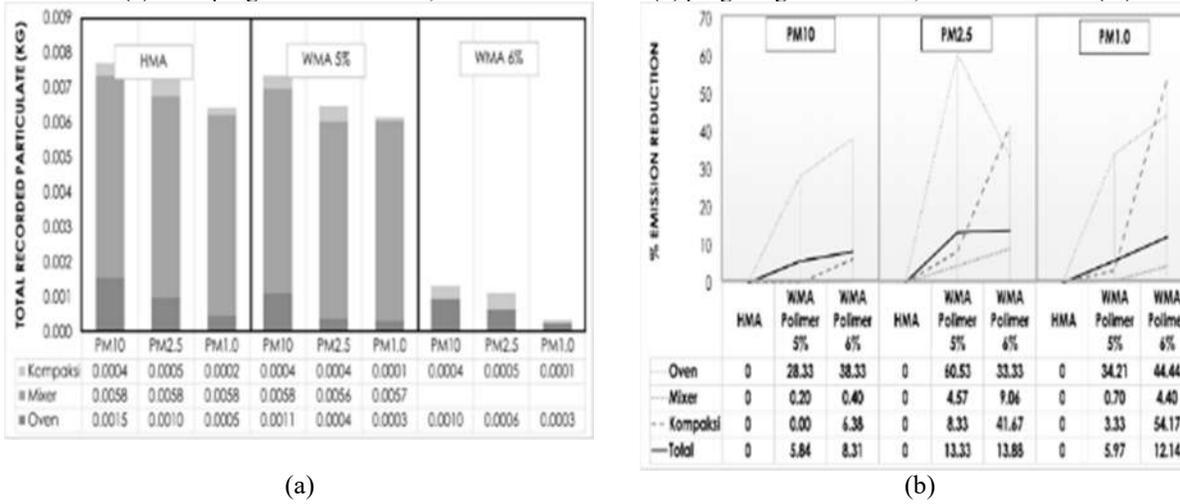
1.5 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Data yang diperoleh dari subbab sebelumnya diolah dengan bantuan *database CML-IA Midpoint* dari aplikasi SimaPro dan Eurobitume untuk menghasilkan luaran analisis dampak yang disajikan pada Gambar 13 - Gambar 19.

Beberapa jenis dampak lingkungan yang menjadi hasil analisis pada studi ini yakni *global warming potential* (GWP), *freshwater aquatic ecotoxicity potential* (FAETP), *human toxicity potential* (HTP), and *photochemical oxidation potential* (POP). Dari Gambar 13 dan Gambar 14, dapat dilihat bahwa tingkat GWP dari WMA yang dimodifikasi polimer melebihi hasil produksi HMA standar dengan selisih mencapai 3.66% untuk penggunaan 5% polimer dan 5.95% untuk penambahan 6% polimer. Hal ini serupa dengan hasil kajian LCA di Cina dan Kolombia, dimana aspek produksi material pada WMA hanya mencapai selisih 2.8% - 5% dibandingkan HMA akibat penambahan aditif zeolit (Araujo et al., 2022a; Ma et al., 2019; Milad et al., 2022c; Vega-Araujo et al., 2020). Aspek transportasi bahan baku ke laboratorium UPH memiliki peran terbesar dalam analisis ini dengan selisih hingga mencapai 20 kali aspek pekerjaan lainnya atau mencapai 90% dari total perhitungan dampak GWP, walaupun perbedaan dalam aspek ini antara sampel HMA dengan WMA modifikasi hanya mencapai 8.59%. Hal yang menarik dari perhitungan dampak ini adalah adanya selisih yang



Gambar 11. (a) Hasil pengukuran emisi CO₂, VOC dan HCHO dan (b) pengurangan emisi CO₂, VOC dan HCHO (%)

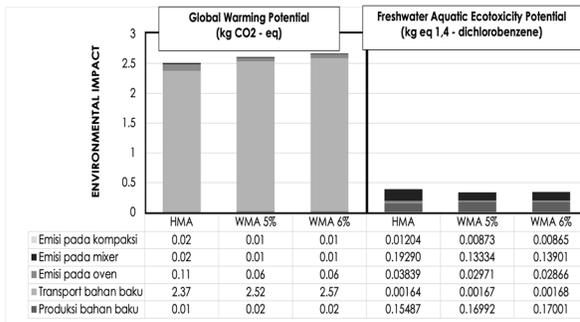


Gambar 12. (a) Hasil pengukuran emisi PM₁₀, PM_{2.5} dan PM_{1.0} dan (b) pengurangan emisi PM₁₀, PM_{2.5} dan PM_{1.0} (%)

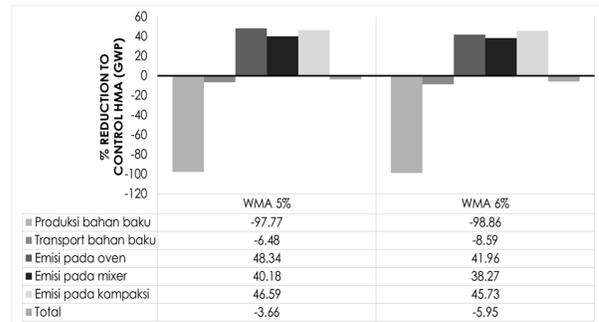
signifikan dalam aspek produksi bahan baku, dimana WMA modifikasi menghasilkan dampak hingga mencapai 97.77% dan 98.86% lebih besar dibandingkan HMA standar. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan material ekstra sebagai bahan tambah pada WMA, yakni zeolite dan polimer EVA. Adapun perbedaan suhu pemanasan hingga kompaksi untuk produksi WMA modifikasi menghasilkan dampak GWP yang lebih kecil dibandingkan HMA dengan selisih sebesar 41 – 48% untuk aspek pemanasan pada oven, 38 - 40% untuk proses pencampuran pada mixer, serta 45 - 47% untuk proses kompaksi sampel. Dapat disimpulkan bahwa untuk aplikasi skala kecil, extra material yang harus diangkut ke lokasi produksi sampel WMA sangat mempengaruhi tingkat dampak GWP yang ditimbulkan, sehingga juga perlu menjadi perhatian dalam proses produksi WMA ke depannya. Akan tetapi, dalam produksi skala besar untuk konstruksi jalan, selisih yang cukup signifikan (rata-rata

di 38 – 47%) pada proses pencampuran hingga pematangan akan sangat mempengaruhi tingkat perhitungan dampak GWP yang dihasilkan. Dapat dilihat juga bahwa penggunaan polimer pada produksi WMA tidak berpengaruh secara eksplisit terhadap peningkatan dampak GWP, selain pada ekstra faktor transportasi bahan baku tersebut.

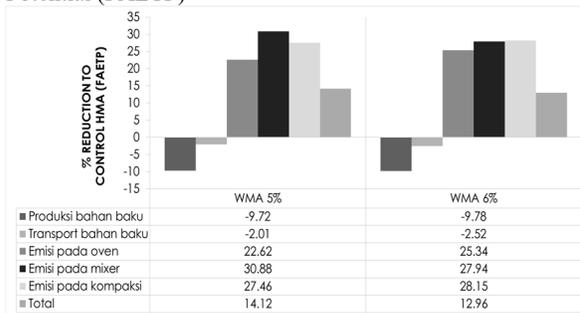
Faktor dampak kedua yang menjadi pembahasan yaitu FAETP yang terlihat di Gambar 13 dan Gambar 15, dimana sampel WMA dengan penambahan polimer menunjukkan hasil 14.12% (penambahan polimer 5%) dan 12.96% (penambahan polimer 6%) lebih rendah dibandingkan dengan sampel HMA standar. Hasil ini sedikit lebih tinggi dengan kajian sebelumnya dengan skala eksperimen lebih besar (ukuran produksi trek uji lapangan) yang menganalisis dampak yang sama dari produksi WMA, yakni sebesar kurang dari 5% dibandingkan dampak dari produksi HMA (Martinez-



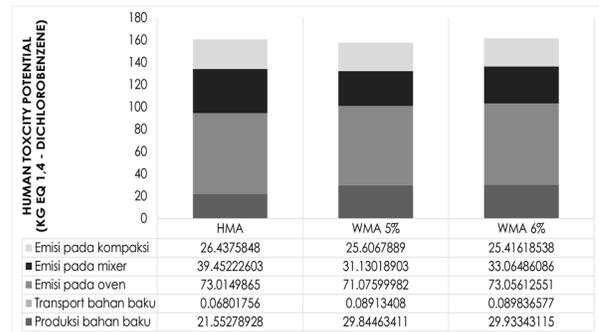
Gambar 13. Hasil perhitungan dampak Global Warming Potential (GWP) dan Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)



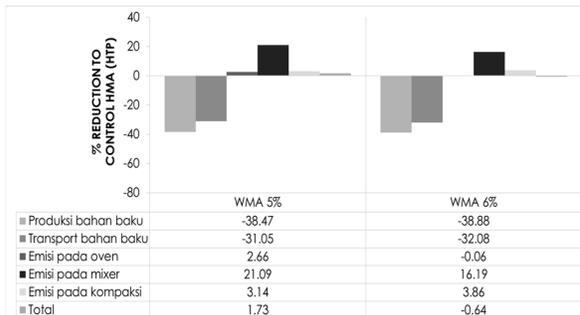
Gambar 14. Persentase penurunan dampak GWP terhadap HMA standar (positif = turun, negatif = naik)



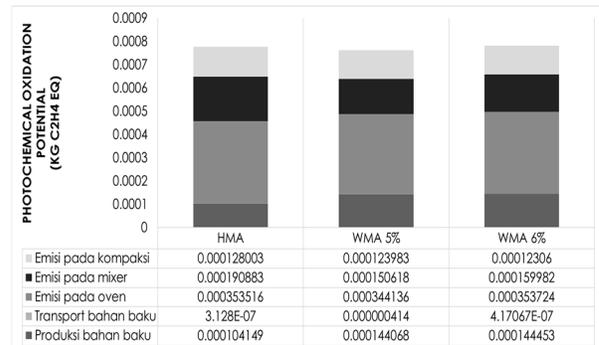
Gambar 15. Persentase penurunan dampak FAETP terhadap HMA standar (positif = turun, negatif = naik)



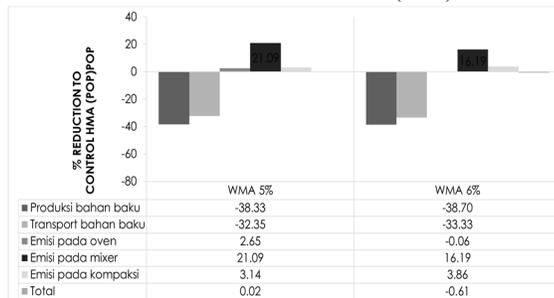
Gambar 16. Hasil perhitungan Human Toxicity Potential (HTP)



Gambar 17. Persentase penurunan dampak HTP terhadap HMA standar (positif = turun, negatif = naik)



Gambar 18. Hasil perhitungan Photochemical Oxidation Potential (POP)



Gambar 19. Persentase penurunan dampak POP terhadap HMA standar (positif = turun, negatif = naik)

Soto et al., 2023). Pada faktor ini, aspek produksi bahan baku dan proses pencampuran sampel menjadi kontributor mayoritas sebesar rata-rata 38% dan 48% dari

total dampak yang dihasilkan, formaldehida (HCHO) menjadi sumber terbesar untuk dampak FAETP terutama pada saat proses pencampuran sampel. Di sini terlihat

bahwa penambahan material aditif pada WMA menghasilkan nilai dampak pada aspek produksi bahan baku yang lebih besar dengan selisih 9.72% dan 9.78% dibandingkan aspek yang sama untuk penggunaan material HMA. Akan tetapi, suhu pengerjaan WMA yang lebih rendah menghasilkan dampak yang lebih kecil dari HMA, mulai dari proses pemanasan material dengan selisih 22.62% dan 25.34%; proses pencampuran pada mixer hingga mencapai 30.88% dan 27.94%; dan kompaksi yang mencapai 27.46% - 28.15% (semua nilai ini untuk penambahan polimer dengan dosis 5% dan 6%). Dapat disimpulkan bahwa suhu pengerjaan yang lebih rendah pada produksi WMA mempengaruhi tingkat emisi HCHO yang tercatat sehingga menghasilkan tingkat dampak yang lebih rendah.

Dua jenis dampak terakhir adalah HTP dan POP, yang ditampilkan pada Gambar 16 - Gambar 19, yang sangat dipengaruhi oleh tingkat emisi VOC, yang menunjukkan nilai total dampak serta rasio antara dampak yang dihasilkan WMA modifikasi dan HMA yang serupa. Terlihat jelas bahwa emisi yang dihasilkan pada proses pemanasan pada oven menghasilkan dampak yang terbesar hingga mencapai lebih dari 45% dari total dampak HTP dan POP, disusul dengan aspek pencampuran pada mixer dengan rentang 19 - 24% dari total dampak. Aspek pencampuran pada mixer menyumbang penurunan dampak terbesar pada kategori ini sebesar 21.09% untuk WMA dengan polimer 5% dan 16.19% untuk WMA dengan polimer 6%, yang disebabkan oleh emisi VOC yang berkurang akibat penurunan suhu pengerjaan pada produksi WMA. Adapun selisih terbesar terjadi pada aspek produksi dan transportasi bahan baku hingga mencapai lebih dari 30%, yang mempengaruhi hasil analisis perbandingan dampak HTP dan POP WMA modifikasi polimer 5% hingga hanya mencapai 1.73% lebih kecil dari HMA standar, sedangkan penggunaan WMA modifikasi polimer 6% menghasilkan nilai dampak sedikit lebih besar dari HMA standar sebesar 0.64%. Hasil yang cukup beragam ini juga ditemukan dari penelitian sejenis sebelumnya, dimana produksi WMA memiliki dampak kurang dari 5% lebih kecil dibandingkan produksi HMA akibat efek penggunaan aditif pada produksi WMA, hingga mencapai 25% pada studi kasus di Korea Selatan (Martinez-Soto et al., 2023; Mazumder et al., 2016).

Dapat disimpulkan melalui seluruh hasil yang ada bahwa penambahan polimer pada WMA dapat menghasilkan performa mekanis yang relatif setara dengan campuran HMA sesuai standar Bina Marga 2018, dan dengan dampak lingkungan yang cenderung lebih kecil. Pada studi ini, terlihat bahwa penggunaan material aditif seperti polimer sangat mempengaruhi aspek produksi dan transportasi bahan baku ke lokasi laboratorium UPH, tetapi keunggulan WMA dalam segi suhu pengerjaan yang lebih rendah hingga 30°C muncul

pada saat proses produksi di lab mulai berlangsung. Hasil ini juga terlihat pada penelitian lain yang telah dibahas sebelumnya di Spanyol yang menyatakan bahwa faktor suhu produksi yang lebih rendah pada WMA dikompensasi oleh penggunaan material ekstra aditif (Vidal et al., 2013). Jumlah produksi sampel yang berskala kecil dapat menyebabkan naiknya proporsi pengaruh faktor transportasi bahan baku tadi sehingga menyebabkan reduksi dampak lingkungan WMA menjadi lebih kecil, dimana kuantitas produksi campuran yang besar menyebabkan faktor ini menjadi kurang berpengaruh terhadap hasil akhirnya (Araujo et al., 2022b; Milad et al., 2022a). Diharapkan ke depannya agar faktor unit fungsi yang digunakan serta cakupan analisis dapat diperluas sehingga memberikan hasil yang lebih komprehensif mengenai topik penggunaan polimer pada campuran aspal hangat (WMA).

4. Kesimpulan

Life Cycle Assessment (LCA) di penelitian ini digunakan untuk membandingkan dampak lingkungan dari produksi campuran aspal hangat (*Warm Mix Asphalt - WMA*) modifikasi polimer EVA dengan dosis 5% dan 6% berat bitumen dengan campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt - HMA*) pada skala laboratorium, selain perbandingan sifat mekanis. Lingkup kajian LCA ini adalah *cradle-to-gate*, dengan data dampak lingkungan merupakan kombinasi *database* Ecoinvent dan Eurobitume untuk produksi bahan baku, serta pengukuran emisi langsung pada tahap produksi sampel aspal yang dilakukan di Laboratorium Aspal Universitas Pelita Harapan. Hasil pengukuran emisi menunjukkan reduksi emisi CO₂ sebesar 46.96% dan 41.82% serta emisi VOC sebesar 7.98% dan 5.3% untuk WMA modifikasi polimer 5% dan 6%, dimana suhu pemanasan material WMA menyumbang 75% dan 53% dari total emisi. Emisi formaldehida (HCHO) serta partikulat (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) untuk produksi WMA pun tercatat mengalami penurunan hingga 27.54% - 29.41% untuk HCHO dan 5.84% - 13.88% untuk PM, dengan kontribusi terbesar berasal dari proses pencampuran pada mixer. Hasil analisis LCA menunjukkan dampak *Global Warming Potential (GWP)* yang dihasilkan WMA 3.66% dan 5.95% dibandingkan HMA akibat faktor transportasi bahan baku yang dominan hingga mencapai 90% dari total dampak. Faktor *Freshwater Aquatic Exotoxicity Potential (FAETP)* yang dihasilkan WMA lebih rendah hingga 12.96% - 14.12%, dengan kontribusi terbesar berasal dari aspek emisi HCHO dari produksi di laboratorium. Produksi sampel WMA menyumbang dampak *Human Toxicity Potential (HTP)* dan *Photochemical Oxidation Potential (POP)* dengan reduksi mulai dari -0.64% - 1.73%, dengan faktor pemanasan material dalam oven menyumbang kontribusi terbesar. Secara rata-rata, aplikasi campuran WMA

dengan penambahan polimer EVA 5% dan 6% menyumbang dampak lingkungan yang lebih rendah dari HMA dengan selisih 3.48% untuk WMA polimer 5% dan 1.43% untuk WMA polimer 6% dengan sifat volumetrik berupa berat jenis dan rongga udara yang relatif setara, serta sifat mekanis berupa Stabilitas Marshall yang hanya sedikit lebih kecil dari HMA (selisih <10%) dan masih sesuai persyaratan standar Bina Marga 2018 (> 8 kN) serta kelelahan (*flow*) hanya sedikit lebih besar dari HMA (selisih <10%) dan relatif masih sesuai persyaratan standar Bina Marga 2018 (2-4 mm). Dapat dikatakan bahwa penggunaan teknologi campuran WMA mempunyai potensi yang baik untuk aplikasi ke depannya dengan menimbang dampak lingkungan yang dapat direduksi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Pelita Harapan atas kontribusi dalam bentuk pembiayaan penelitian melalui hibah nomor 413/LPPM-UPH/XII/2021, serta kepada PT. Enceha Pacific atas kolaborasi dalam proses penelitian yang menunjang studi ini melalui penyediaan material yang digunakan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ain, T. N., Auvaria, S. W., & Nurmaningsih, D. R. (2022). Perkiraan Potensi Pemanasan Global pada Skenario Pengelolaan Sampah Domestik di Kota Sukabumi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(2), 214–221. <https://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JTL/article/view/4919/4347>
- Albayati, A. H., Al-Mosawe, H. M., Allawi, A. A., & Oukailli, N. (2018). Moisture Susceptibility of Sustainable Warm Mix Asphalt. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3109435>
- Apostolidis, P., Liu, X., Daniel, C. G., & Erkens, S. (2019). Fracture Performance of Synthetic Fibre-Reinforced Asphalt Mortar Fracture Performance of Synthetic Fibre-Reinforced Asphalt Mortar Section of Pavement Engineering Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology Department of C. February.
- Apostolidis, P., Liu, X., Daniel, G. C., Erkens, S., & Scarpas, T. (2020). Effect of synthetic fibres on fracture performance of asphalt mortar. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1918–1931. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1574235>
- Araujo, D. L. V., Santos, J., & Martinez-Arguelles, G. (2022a). Environmental performance evaluation of warm mix asphalt with recycled concrete aggregate for road pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2064999>
- Araujo, D. L. V., Santos, J., & Martinez-Arguelles, G. (2022b). Environmental performance evaluation of warm mix asphalt with recycled concrete aggregate for road pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2064999>
- Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gómez, M. del C. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/su11030646>
- Centre for Ecotoxicology, E., & of Chemicals, T. (2016). TR127: Freshwater ecotoxicity as an impact category in life cycle assessment.
- Chong, D., Wang, Y., Guo, H., & Lu, Y. (2014). Volatile Organic Compounds Generated in Asphalt Pavement Construction and Their Health Effects on Workers. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000801](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000801)
- Cristobal-Garcia, J., Reale, F., Sala, S., Pant, R., & European Commission. Joint Research Centre. (2016). Life cycle assessment for the impact assessment of policies. Publications Office.
- Daniel, C. G., Liu, X., Apostolidis, P., Erkens, S. M. J. G., & Scarpas, A. (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., Vol. 1, Issue 3, pp. 358–362). Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003251125>
- Daniel, C. G., Widjajakusuma, J., Otto, I., & Saputan, C. (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>
- Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan, K. L. H. dan K. (2021). Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA).
- Dirjen Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.
- Espinoza, M., Campos, N., Yang, R., Ozer, H., Aguiar-Moya, J. P., Baldi, A., Loría-Salazar, L. G., & Al-Qadi, I. L. (2019). Carbon footprint estimation in road construction: La Abundancia-Florencia case

- study. Sustainability (Switzerland), 11(8). <https://doi.org/10.3390/su11082276>
- European Asphalt Pavement Association. (2014). The use of Warm Mix Asphalt. www.eapa.org
- European Environment Agency. (2016). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016.
- Fistcar, W. A. (n.d.). Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan-Samarinda.
- Fistcar, W. A. (2020). Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. Jurnal Aplikasi Teknik Sipil, 18(2), 307–314. <https://iptek.its.ac.id/index.php/jats>
- Florkova, Z., Sedivy, S., & Pastorkova, J. (2021). The environmental impact of asphalt mixtures production for road infrastructure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1015(1), 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1015/1/012097>
- Giustozzi, F., Crispino, M., Toraldo, E., & Mariani, E. (2015). Mix design of polymer-modified and fiber-reinforced warm-mix asphalts with high amount of reclaimed asphalt pavement: Achieving sustainable and high-performing pavements. Transportation Research Record, 2523, 3–10. <https://doi.org/10.3141/2523-01>
- Hamilton, S. F., & Requate, T. (2012). Emissions standards and ambient environmental quality standards with stochastic environmental services. Journal of Environmental Economics and Management, 64(3), 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.05.001>
- Hertwich, E. G., Mateles, S. F., Pease, W. S., & Mckone, T. E. (2001). Life-Cycle Assessment Human Toxicity Potentials For Life-Cycle Assessment And Toxics Release Inventory Risk Screening. In Environmental Toxicology and Chemistry (Vol. 20, Issue 4). www.scorecard.org
- Iterchemica. (n.d.-a). Superplast Polymeric Compound For Bituminous Mixes Modification. www.iterchimica.it
- Iterchemica. (n.d.-b). SUPERPLAST.1.
- Jahnke, J. A. (2022). Continuous Emission Monitoring (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- JRC Science Hub. (2016). Guide for interpreting life cycle assessment result.
- Jullien, A., Gaudefroy, V., Ventura, A., de la Roche, C., Monéron, P., & Paranhos, R. (2010). Airborne emissions assessment of hot asphalt mixing: Methods and limitations. Road Materials and Pavement Design, 11(1), 149–169. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690264>
- Khater, A., Luo, D., Abdelsalam, M., Ma, J., & Ghazy, M. (2021). Comparative life cycle assessment of asphalt mixtures using composite admixtures of lignin and glass fibers. Materials, 14(21). <https://doi.org/10.3390/ma14216589>
- Lawrence, E. O., Mckone, T. E., & Hertwich, E. G. (2001). LBNL-48254 The Human Toxicity Potential and a Strategy for Evaluating Model Performance in Life-Cycle Impact Assessment.
- 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
- Lushinga, N., Cao, L., Dong, Z., Yang, C., & Assogba, C. O. (2020). Performance Evaluation of Crumb Rubber Asphalt Modified with Silicone-Based Warm Mix Additives. Advances in Civil Engineering, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4840825>
- Ma, H., Zhang, Z., Zhao, X., & Wu, S. (2019). A comparative life cycle assessment (LCA) of warm mix asphalt (WMA) and hot mix asphalt (HMA) pavement: A case study in China. Advances in Civil Engineering, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9391857>
- Martin, H., Kerstin, Z., & Joachim, M. (2019). Reduced emissions of warm mix asphalt during construction. Road Materials and Pavement Design, 20(sup2), S568–S577. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1628426>
- Martinez-Soto, A., Calabi-Floody, A., Valdes-Vidal, G., Hucke, A., & Martinez-Toledo, C. (2023). Life Cycle Assessment of Natural Zeolite-Based Warm Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement. Sustainability, 15(2), 1003. <https://doi.org/10.3390/su15021003>
- Masri, Ts. Dr. K. A., R. Ferdaus, & P.J. Ramadhansyah. (2022). Sustainable Use of Polymer in Asphalt Mixture: A Review. CONSTRUCTION, 2(2), 12–21. <https://doi.org/10.15282/construction.v2i2.7744>
- Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. H., & Lee, S. J. (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. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>
- McNally, T., & Pötschke, P. (2011). Polymer modified bitumen: Properties and Characterisation. Woodhead Pub.
- Mejías-Santiago, M., & Osborn, L. V. (2014). Emissions Reductions Associated with the Use of Warm-Mix Asphalt as Compared to Hot-Mix Asphalt Geotechnical and Structures Laboratory. www.erdc.usace.army.mil

- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022a). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022b). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022c). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- Montanelli, Eng. F., & srl, I. (2013). Fiber/Polymeric Compound for High Modulus Polymer Modified Asphalt (PMA). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.096>
- Mukherjee, A. (2016a). Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration.
- Mukherjee, A. (2016b). Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration.
- National Asphalt Pavement Association. (2012). *Warm-Mix Asphalt: Best Practices - Quality Improvement Publication* 125 3rd Edition. www.AsphaltPavement.org
- National Pollutant Inventory Australia. (1999). *Emission Estimation Technique Manual for Hot Mix Asphalt Manufacturing*.
- Nur Naqibah Kamarudin, S., Rosli Hainin, M., Khairul Idham Mohd Satar, M., & Naquiddin Bin Mohd Warid, M. (2018). Comparison of Performance between Hot and Warm Mix Asphalt as Related to Compaction Design. *Journal of Physics: Conference Series*, 1049(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1049/1/012036>
- Oktopianto, Y., & Hidayat, D. W. (n.d.). Analisis Efisiensi Penggunaan Teknologi Aspal Daur Ulang Pada Jalan Tol Elevated Ir. Wiyoto Wiyono.
- Oreto, C., Russo, F., Veropalumbo, R., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Dell'acqua, G. (2021). Life cycle assessment of sustainable asphalt pavement solutions involving recycled aggregates and polymers. *Materials*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/ma14143867>
- Park, W. J., Kim, R., Roh, S., & Ban, H. (2020). Analysis of major environmental impact categories of road construction materials. *Sustainability (Switzerland)*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/su12176951>
- Piccone, G., Loprencipe, G., Almeida, A., & Fiore, N. (2020a). Evaluation of the performance of a warm mix asphalt (Wma) considering aged and unaged specimens. *Coatings*, 10(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/coatings10121241>
- Piccone, G., Loprencipe, G., Almeida, A., & Fiore, N. (2020b). Evaluation of the performance of a warm mix asphalt (Wma) considering aged and unaged specimens. *Coatings*, 10(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/coatings10121241>
- Rahman, M. A., Ghabchi, R., Zaman, M., & Ali, S. A. (2021). Rutting and moisture-induced damage potential of foamed warm mix asphalt (WMA) containing RAP. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00528-7>
- Rilwani, M. L., & Agbanure, F. E. (2010). An assessment of the environmental impact of asphalt production in Nigeria. *Anthropologist*, 12(4), 277–287. <https://doi.org/10.1080/09720073.2010.11891167>
- Romadhon, Fanani, Z., Wicaksono, A., & Kurniawan, A. (2020a). Analysis Of Pollution Level On Asphalt Mixing Plant Factory Activities In Grogol District Of Kediri Regency, Indonesia. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 104(8), 33–38. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2020-08.04>
- Romadhon, Fanani, Z., Wicaksono, A., & Kurniawan, A. (2020b). Environmental Impact Resulting From Asphalt Mixing Plant's Activities At Grogol, Kediri. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 104(8), 165–174. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2020-08.18>
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm Mix Asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2022). Comparative life cycle assessment of reprocessed plastics and commercial polymer modified asphalts. *Journal of Cleaner Production*, 337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130464>
- Santos, J., Cerezo, V., Soudani, K., & Bressi, S. (2018). A Comparative Life Cycle Assessment of Hot Mixes Asphalt Containing Bituminous Binder Modified

- with Waste and Virgin Polymers. *Procedia CIRP*, 69, 194–199.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.046>
- Sarasputri, D. A. (2022). Life Cycle Assessment (LCA) Perkerasan Jalan Beraspal Dengan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Di Ruas Jalan Nasional Provinsi Jawa Barat. Universitas Indonesia.
- SICK Sensor Intelligence. (2021). Continuous Monitoring Of Emissions In Asphalt Mixing Plants. https://cdn.sick.com/media/docs/0/60/260/special_information_operator_friendly_all_in_one_solution_construction_materials_en_im0096260.pdf
- Sollazzo, G., Longo, S., Cellura, M., & Celauro, C. (2020). Impact analysis using life cycle assessment of asphalt production from primary data. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–21.
<https://doi.org/10.3390/su122410171>
- Sukhija, M., & Saboo, N. (2021). A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field. In *Construction and Building Materials* (Vol. 274). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121781>
- Tacoma-Pierce. (2020). Asphalt Production Policy Health Impact Assessment Asphalt Production Policy Health Impact Assessment.
- Tang, N., Yang, K. kai, Alrefaei, Y., Dai, J. G., Wu, L. M., & Wang, Q. (2020). Reduce VOCs and PM emissions of warm-mix asphalt using geopolymer additives. *Construction and Building Materials*, 244.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118338>
- Tarannum, N., Brishti, B. S. R., Dima, S. S., & Kirtania, K. (2021). Life-Cycle Impact Assessment of Fossil Power Plants with and without Co2 Capture Evaluating the Possibility of Co2 Utilization. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 88–93.
<https://doi.org/10.3329/cerb.v22i1.54305>
- Tiwary, A., & Colls, J. (2010). *Air Pollution: Measurement, modelling and mitigation*, Third edition (3rd ed.).
- Tutu, K. A., & Tuffour, Y. A. (2016a). Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 06(02), 84–93.
<https://doi.org/10.4236/ojce.2016.62008>
- Tutu, K. A., & Tuffour, Y. A. (2016b). Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 06(02), 84–93.
<https://doi.org/10.4236/ojce.2016.62008>
- US EPA. (2000). *Hot Mix Asphalt Plants - Emission Assessment Report*.
- Vega-Araujo, D., Martinez-Arguelles, G., & Santos, J. (2020). Comparative life cycle assessment of warm mix asphalt with recycled concrete aggregates: A Colombian case study. *Procedia CIRP*, 90, 285–290.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.126>
- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., & Rubio, M. C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 101–114.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>
- Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., & Scarpas, T. (2018). Rheological behavior and its chemical interpretation of crumb rubber modified asphalt containing warm-mix additives. *Transportation Research Record*, 2672(28), 337–348.
<https://doi.org/10.1177/0361198118781376>
- Wang, H., Liu, X., van de Ven, M., Lu, G., Erkens, S., & Skarpas, A. (2020). Fatigue performance of long-term aged crumb rubber modified bitumen containing warm-mix additives. *Construction and Building Materials*, 239.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117824>
- Wang, M., Wang, C., Huang, S., & Yuan, H. (2021). Study on asphalt volatile organic compounds emission reduction: A state-of-the-art review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 318). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128596>
- Wildnauer, M., Mulholland, E., Liddie, J., Koffler, C., & Murphy, S. (2019). Title: Life Cycle Assessment of Asphalt Binder On behalf of thinkstep AG and its subsidiaries Document prepared by Quality assurance by Under the supervision of.
- Wirahadikusumah, R. D., & Sahana, H. P. (2012). Estimasi Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Pekerjaan Pengaspalan Jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), 25–36.
- Xiu, M., Wang, X., Morawska, L., Pass, D., Beecroft, A., Mueller, J. F., & Thai, P. (2020). Emissions of particulate matters, volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons from warm and hot asphalt mixes. *Journal of Cleaner Production*, 275.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123094>
- Zaumanis, M. (2010). *Warm Mix Asphalt Investigation*. Technical University Of Denmark.
- Zaumanis, M. (2014a). Warm mix asphalt. *Green Energy and Technology*, 204, 309–334.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_10
- Zaumanis, M. (2014b). Warm mix asphalt. *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements*, 309–334. Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S. N., & Putman, B. J. (2012). Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 31, 265–272.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.101>