



## EVALUASI EMISI GAS RUMAH KACA WARM MIX ASPHALT METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT

Andry Yuliyanto<sup>1)\*</sup>, Galih Rio Prayogi<sup>1)</sup>, Deny Syahputra<sup>1)</sup>, Kirtinanda P.<sup>1)</sup>, Ade Candra Kurniawan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia  
Surel: <sup>1)</sup>andry.yuliyanto@si.itera.ac.id

### ARTIKEL INFO

#### Kata Kunci:

Life Cycle Assessment,  
Warm Mix Asphalt, Gas  
Rumah Kaca, Efisiensi  
Energi

#### Keywords:

Life Cycle Assessment,  
Warm Mix Asphalt,  
Greenhouse Gases, Energy  
Efficiency

#### ABSTRACT

The Lampung Provincial Road and Construction Agency reported in 2022 that approximately 391.985 km or 23.05% of road infrastructure was damaged. The use of hot mix asphalt (HMA) for road repairs requires high production temperatures, resulting in increased energy consumption, fuel costs, and GHG emissions. Therefore, the environmental impact of road paving should not be ignored. Additives are added to the mixture to lower the mixing temperature, resulting in a mixture known as warm mix asphalt (WMA). In analyzing the potential for environmental impact savings, LCA was used. Inventory data was obtained from previous research literature studies. LCA was conducted based on a gate-to-gate approach that only covered the mixing process at the asphalt mixing plant (AMP). This study aims to determine the potential for energy reduction, fuel consumption savings, GHG reduction, and total cost savings in the alternative use of WMA in provincial road repairs in Lampung Province. Five types of WMA alternatives were considered, namely WMA with Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, and Asphaltan additives. The results of the study show that WMA can reduce the mixing temperature and provide energy savings of between 3.15% and 13.65%. From an environmental perspective, WMA also reduces GHG emissions, with a reduction potential of up to 5.00 kgCO<sub>2</sub> per ton of mixture, equivalent to 13.22% compared to HMA. Economically, the use of WMA provides potential production cost savings ranging from 3.05% to 13.22%. Among the five types of additives tested (Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, and Asphaltan), the LEA additive proved to be the most environmentally friendly alternative while also providing the greatest energy and cost savings.

DOI: [10.58499/jatan.v42i2.1340](https://doi.org/10.58499/jatan.v42i2.1340) diterima: 17 November 2024; direvisi: 08 Oktober 2025; disetujui: 31 November 2025

### PENDAHULUAN

Dalam konteks pembangunan nasional, para pelaku di sektor jasa konstruksi perlu menyadari bahwa meskipun sektor ini memberikan kontribusi positif terhadap pertumbuhan ekonomi, aktivitas konstruksi juga membawa dampak signifikan terhadap lingkungan. Aktivitas konstruksi menghasilkan dampak lingkungan signifikan, seperti konsumsi energi tinggi dan emisi gas rumah kaca (GHG), terutama dari penggunaan mesin, produksi, dan transportasi bahan bangunan. Oleh karena itu, penting bagi pelaku konstruksi untuk mengadopsi praktik ramah lingkungan, seperti penerapan teknologi efisien energi dan bahan bangunan berkelanjutan (Hao Wang, 2019).

Data kuantitatif terkait dampak konstruksi di Indonesia masih sulit diperoleh, tetapi bisa dianalogikan dengan data dari negara lain. Di AS, sektor transportasi menyumbang 27% dari total emisi GHG pada tahun 2015 (Thives & Ghisi, 2017). Salah satu material utama yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur jalan adalah aspal campuran panas (HMA), yang berkontribusi pada emisi tinggi akibat proses produksi yang memerlukan

temperatur tinggi (Alejandra T. Calabi-Floody, 2020). Oleh karena itu, infrastruktur jalan harus menghadapi tantangan untuk mengurangi pencemaran dan penggunaan energi tak terbarukan secara berkelanjutan (Ana María Rodríguez-Alloza, 2015).

Salah satu solusi inovatif untuk mengurangi dampak lingkungan adalah aspal campuran hangat (WMA) yang telah dikembangkan untuk menurunkan temperatur produksi HMA, yang mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi GHG (Huayang, 2017). Teknologi WMA diklasifikasikan menjadi tiga kelompok: tambahan organik, bahan kimia, dan proses pembusaan (Siyuan Xu, 2017). Evaluasi dampak lingkungan dan efektivitas biaya menggunakan analisis siklus hidup (LCA) dapat membantu mengidentifikasi dampak signifikan dari proyek konstruksi (Hui Ma, 2019). Metode ini juga telah diterapkan pada penelitian perkerasan jalan dengan material daur ulang. Misalnya, Sarasputri (2022) melaporkan bahwa penggunaan 50% *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) pada jalan nasional di Jawa Barat mampu menurunkan global warming potential (GWP) sebesar 1,05 ton CO<sub>2</sub> eq serta mengurangi kelangkaan sumber daya fosil sebesar



19,60 ton oil eq dibandingkan aspal tanpa RAP (Sarasputri, 2022).

Provinsi Lampung masih menghadapi tantangan serius terkait infrastruktur jalan. Menurut data dari Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Lampung tahun 2022, dari total panjang infrastruktur jalan 1.693,273 km, sekitar 391,985 km atau 23,05% mengalami kerusakan. Kondisi ini menunjukkan perlunya upaya pemeliharaan dan perbaikan yang efisien, baik dari segi biaya maupun dampak lingkungan di Provinsi Lampung. Oleh karena itu, penelitian mengenai *Life Cycle Assessment* (LCA) pada perbaikan jalan dengan metode *overlay* menggunakan *warm mix asphalt* menjadi penting untuk dilakukan di wilayah ini.

Penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi metode perbaikan jalan yang tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga efisien secara lingkungan dan ekonomi (Daniela Vega-Araujoa, 2020). *Warm mix asphalt* memiliki potensi mengurangi emisi dan konsumsi energi dibandingkan metode konvensional, tetapi kajian dampak lingkungannya di daerah Lampung masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan informasi tentang pengurangan emisi GHG dan analisis biaya total dalam penggunaan WMA pada konstruksi jalan yang rusak berat di Lampung. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik di industri konstruksi untuk mencapai pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

Terlepas dari fakta bahwa banyak penelitian di seluruh dunia telah dilakukan tentang efisiensi energi *warm-mix asphalt* (WMA), penelitian ini memberikan kontribusi yang berbeda dengan melakukan analisis komparatif terhadap lima jenis aditif WMA secara

bersamaan dalam satu studi, yang dikaji secara bersamaan dari sisi energi, emisi gas rumah kaca (GHG), dan biaya. Selain itu, parameter lokal seperti suhu lingkungan dan biaya bahan bakar di Provinsi Lampung adalah pendekatan baru yang belum banyak digunakan dalam penelitian LCA di wilayah tropis, terutama di Indonesia.

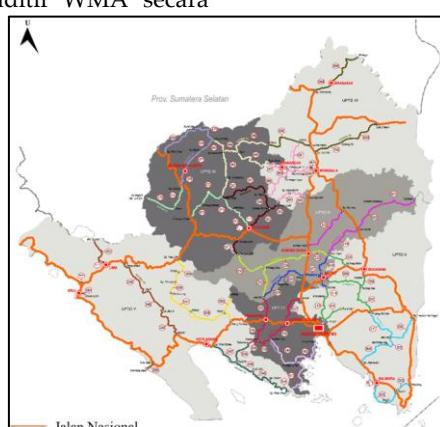
## HIPOTESIS

Dalam proyek perbaikan jalan di Provinsi Lampung, penggunaan WMA dibandingkan dengan HMA menawarkan berbagai keuntungan. WMA dapat mengurangi konsumsi energi, menghemat bahan bakar selama produksi dan penerapannya, dan menurunkan emisi gas rumah kaca (GHG). WMA menjadi solusi yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis untuk pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan karena tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan tetapi juga menghemat uang selama siklus hidup proyek perbaikan jalan.

## METODOLOGI

### Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada tahun 2024 menggunakan metode kuantitatif dengan menganalisis potensi penggunaan WMA dibanding HMA pada perbaikan jalan di Provinsi Lampung. WMA yang diamati adalah jenis campuran yang telah ditambahkan zat adatif Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, Asphaltan, Evotherm, dan Rediset. Total panjang jalan provinsi yang diperbaiki menggunakan *overlay* adalah jalan dengan kondisi sedang dan rusak ringan sepanjang 595,139 km.



Sumber: Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Lampung (2024)

**Gambar 1.** Peta jaringan di Provinsi Lampung

### Pengumpulan Data

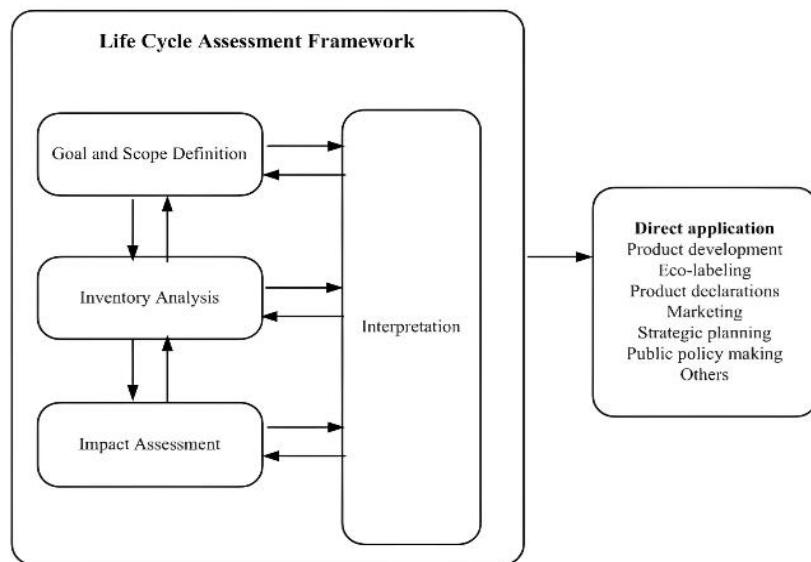
Untuk menggambarkan kondisi aktual di Provinsi Lampung, studi ini menggunakan data volume *overlay* sepanjang 595,139 km. Panjang jalan

tersebut tidak digunakan sebagai unit fungsi dalam studi ini, tetapi hanya untuk menggambarkan skala kebutuhan perbaikan jalan di Provinsi Lampung. Selain itu, diperlukan data temperatur provinsi Lampung,

data energi pencampuran HMA, data temperatur pencampuran WMA, dan harga bahan bakar nonsubsidi Provinsi Lampung. Dengan menggunakan parameter-parameter ini, hasil analisis LCA menjadi lebih representatif terhadap situasi nyata di lapangan dan dapat dijadikan rujukan dalam pengambilan keputusan perencanaan perbaikan jalan secara lebih berkelanjutan.

### Metode Analisa Data

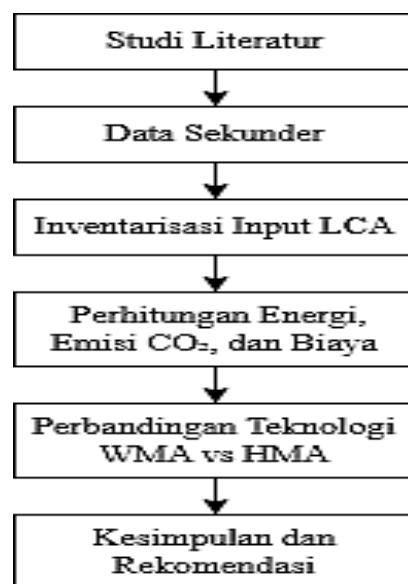
Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengukur dampak lingkungan dari setiap teknologi pencampuran aspal. Metode LCA yang digunakan mengacu pada standar ISO 14040 dan ISO 14044. Kerangka LCA berdasarkan ISO 14040 terdiri dari penentuan tujuan dan ruang lingkup (*Goal and Scope Definition*), analisis inventaris (*Inventory Analysis*), penilaian dampak (*Impact Assessment*), dan interpretasi hasil (*Interpretation*). Kerangka LCA dapat dilihat pada Gambar 2.



Sumber: ISO 14040 (1997)  
**Gambar 2.** Tahapan LCA

Untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai proses penelitian yang dilakukan, berikut disajikan alur penelitian yang menunjukkan tahapan

dari pengumpulan data hingga interpretasi hasil analisis berdasarkan pendekatan *Life Cycle Assessment*.



**Gambar 3.** Skema alur penelitian Life Cycle Assessment pada teknologi WMA dan HMA

Dalam studi literatur menggunakan data sekunder dari penelitian terdahulu seperti penelitian Wu *et al.* (2021) dan Floody *et al.* (2020).

Dalam penelitian ini, *hot mix asphalt* (HMA) digunakan sebagai *baseline* atau acuan utama dalam analisis LCA. Seluruh hasil perhitungan *Warm Mix Asphalt* (WMA) ditampilkan relatif terhadap HMA sehingga persentase penghematan energi, emisi GHG, dan biaya dapat dihitung secara jelas dan konsisten.

### **Goal and Scope Definiton**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merumuskan dan menjelaskan tujuan, sistem yang dianalisis, batasan, dan asumsi yang berkaitan dengan dampak dari sistem yang dievaluasi sepanjang siklus hidup dari sistem tersebut. Dalam penelitian ini digunakan pendekatan *gate-to-gate*, yaitu ruang lingkup paling singkat yang hanya memfokuskan pada analisis proses-proses yang memberikan pengaruh signifikan terhadap siklus hidup, khususnya pada tahap produksi campuran aspal di AMP.

Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan serta efisiensi ekonomi dari penggunaan lima jenis *warm mix asphalt* (WMA) terhadap *hot mix asphalt* (HMA) pada kegiatan perbaikan jalan di

Provinsi Lampung. Fokus evaluasi meliputi konsumsi energi, emisi gas rumah kaca (GHG), dan total biaya pencampuran, sebagai upaya mendukung pengambilan keputusan dalam pembangunan infrastruktur jalan yang berkelanjutan.

Unit fungsi dalam studi ini adalah 1.000 kg campuran aspal yang diproduksi di *Asphalt Mixing Plant* (AMP). Unit ini digunakan sebagai dasar pembanding agar hasil analisis antara alternatif WMA dan HMA dapat dibandingkan secara konsisten.

### **Inventory Analysis**

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data terkait *input* dan *output* yang terlibat dalam proses produksi campuran HMA dan WMA, yakni inventaris konsumsi energi, data harga bahan bakar, nilai koefisien konversi energi panas dari berbagai jenis bahan bakar, dan faktor konversi jenis bahan bakar menjadi CO<sub>2</sub>.

Inventaris konsumsi energi pada produksi HMA dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah. Tabel 1 merupakan penelitian yang telah dilakukan di Negara Chili. Oleh karena itu, temperatur lingkungan pada penelitian ini disesuaikan dengan suhu di Provinsi Lampung.

**Tabel 1.** Inventaris konsumsi energi produksi HMA

Parameter	Nilai	Satuan
C <sub>agg</sub>	850	J/(kg°C)
C <sub>sand</sub>	850	J/(kg°C)
C <sub>bitumen</sub>	2.093,400	J/(kg°C)
C <sub>a</sub>	4.200	J/(kg°C)
C <sub>v</sub>	1.850	J/(kg°C)
C <sub>lv</sub>	2.250.000	J/(kg°C)
W <sub>agg</sub>	1	%
W <sub>sand</sub>	4	%
t <sub>tamb</sub>	15	°C
t <sub>agg</sub>	145 - 165	°C
t <sub>sand</sub>	145 - 165	°C
t <sub>diesel</sub>	145 - 165	°C
<b>Daya kalor bahan bakar minyak</b>		Cal/kg
Q <sub>diesel</sub>	0,9994	kg/L
<b>m</b>	1.000	kg

Sumber: Floody *et al.* (2020) dan Ismael (2018)

Keterangan: C<sub>agg</sub> = kalor jenis agregat, C<sub>sand</sub> = kalor jenis pasir, C<sub>bitumen</sub> = kalor bitumen, C<sub>w</sub> = kalor jenis air, C<sub>v</sub> = kalor jenis uap, C<sub>lv</sub> = kalor latent penguapan air, W<sub>agg</sub> = kadar air agregat, W<sub>sand</sub> = kadar air pasir, t<sub>tamb</sub> = temperatur lingkungan, t<sub>agg</sub> = temperatur pemanasan agregat, t<sub>sand</sub> = temperatur pemanasan pasir , Q<sub>diesel</sub> = masa jenis bahan bakar solar, m = masa yang diamati

Tabel 1 merupakan hasil penelitian yang dilakukan di Negara Chili sehingga data yang tercantum di dalamnya didasarkan pada kondisi temperatur ruang atau ambient temperature yang berlaku di Chili. Namun, untuk mengaplikasikan hasil penelitian tersebut secara akurat di Provinsi Lampung,

perlu dilakukan penyesuaian temperatur agar sesuai dengan kondisi lokal. Temperatur minimum di Provinsi Lampung dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Temperatur lingkungan Provinsi Lampung

Tahun	Temperatur (°C)		
	Min	Max	Rata-rata
2014	20,097	32,637	26,367
2015	20,000	33,160	26,580
2016	24,897	33,517	29,207
2017	24,941	33,600	29,271
2018	24,684	33,925	29,305
2019	24,483	34,450	29,466
2020	24,736	33,300	29,018
2021	24,296	33,347	28,821
2022	24,910	33,812	29,361
2023	25,100	33,536	29,318
Rata-rata (°C)			28,671

Sumber: BMKG Stasiun Metereologi Kelas IV Maritim Panjang (2024)

Tabel 2 memberikan informasi penting mengenai temperatur pencampuran yang digunakan dalam tiga teknologi WMA. Ketiga teknologi ini menunjukkan kemampuan yang signifikan dalam

mengurangi temperatur pencampuran, dengan penurunan yang berkisar dari 6°C hingga 35°C.

Temperatur pencampuran yang digunakan dalam tiga teknologi WMA terdapat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Temperatur Pencampuran WMA

Technology	Additives	Temperatur Pencampuran (°C)	Temperatur Pemadatan (°C)
<i>Foaming Technology</i>	Asphamin	125-145	115-121
	Advera	136-156	112-127
	LEA	119-139	90-99
<i>Organic Additives</i>	Sasobit	139-159	115-121
	Asphaltan	125-145	105-125
<i>Chemical Agents</i>	Evotherm	110-130	107-117
	Rediset	131-151	115-132

Sumber: Wu *et al.* (2021), Ismael (2018), Xiao (2010), dan Jasim (2024)

Bahan bakar minyak yang digunakan pada AMP adalah solar industri atau solar nonsubsidi jenis

HSFO. Adapun informasi mengenai bahan bakar minyak nonsubsidi di Indonesia terdapat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Harga BBM non subsidi di Indonesia

Jenis BBM	Harga Per Liter (Rp/L)			
	Wilayah 1	Wilayah 2	Wilayah 3	Wilayah 4
HSD B35	21500	21500	21600	21750
HSFO	15550	15650	15750	15900
LSFO	19200	19200	19200	19200
Pertamina Dex	23300	23300	23400	23500
Dexlite	22900	22900	23000	23150
Pertamax	18800	18900	19000	19150
Pertamax Turbo	20150	20250	20350	20500
Pertalite	18000	18100	18200	18350

Sumber: Alfaridzi (2024)

Pada Tabel 4 harga solar industri jenis HSFO untuk Provinsi Lampung yang masuk pada wilayah 1 adalah Rp15.550/liter (Alfaridzi, 2024). Untuk mendapatkan volume kebutuhan bahan bakar pada proses pencampuran HMA atau WMA, dibutuhkan

faktor konversi energi panas menjadi volume bahan bakar (Meor Othman Hamzah, 2010). Adapun nilai koefisien konversi energi panas dari berbagai jenis bahan bakar terdapat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Nilai konversi energi dari jenis bahan bakar

Jenis Bahan Bakar	Koefisien	Satuan
Diesel	0,006833387	Gallon/Mj
Gas Alam	0,9220	Cubic feet/Mj
Batu Bara	0,00004263	Ton/Mj

Sumber: Wu *et al.* (2021)

Berdasarkan Tabel 5, nilai konversi energi dari diesel senilai 0,006 gallon/Mj.

Dalam menentukan banyaknya polutan yang diakibatkan dari konsumsi energi, diperlukan faktor

konversi jenis bahan bakar menjadi GHG. Data faktor konversi jenis bahan bakar menjadi GHG terdapat pada

Tabel 6.

**Tabel 6.** Nilai konversi bahan bakar menjadi GHG (Kg CO<sub>2</sub>)

Jenis Bahan Bakar	Satuan Pengukuran	Total GHG
Diesel	Liter	2,70553
Gas Alam	Meter Kubik	1,84835
Batu Bara	Ton	2.403,84

Sumber: Wu et al. (2021)

Berdasarkan Tabel 6, diketahui nilai GHG akibat penggunaan bahan bakar diesel sebesar 2,70553/liter. Meskipun tabel ini mencantumkan beberapa jenis bahan bakar, dalam studi ini hanya konsumsi bahan bakar diesel yang digunakan dalam perhitungan. Data bahan bakar lainnya ditampilkan untuk keperluan referensi.

#### Impact Assessment



Sumber: ISO 14040 (1997)

**Gambar 4.** Empat fase pemodelan

Untuk melengkapi fase kedua, tabel biaya dibuat dengan mengumpulkan data di lapangan yang disediakan oleh perusahaan pencampuran aspal lokal, yang menggabungkan biaya utama yang terkait dengan produksi campuran aspal konvensional. Selain itu, persamaan konsumsi energi yang digunakan untuk menentukan konsumsi energi selama tahap produksi dan untuk menghubungkan variabel ini dengan perubahan suhu (Persamaan (1)-(5)) (Alejandra T. Calabi-Floody, 2020).

$$Q_{agg} = C_{agg} \times m_{agg} \times (t_m - t_a) \dots \quad (1)$$

Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan agregat (kJ) (1)

$$Q_{wat} = C_w \times \left( \frac{m_{agg}}{m_{agg} \times (W_{agg} \times m_{agg})} \right) \times m \times (100 - t_a) \dots \quad (2)$$

Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan air yang ada dalam agregat (kJ) (2)

$$Q_{Ewat} = Lv \times \left( \frac{m_{agg}}{m_{agg} \times (W_{agg} \times m_{agg})} \right) \times m_{agg} \dots \quad (3)$$

Energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air dari agregat (kJ) (3)

$$Q_{Watvapor} = C_v \times \left( \frac{m_{agg}}{m_{agg} \times (W_{agg} \times m_{agg})} \right) \times m_{agg} \times (t_m - 100) \dots \quad (4)$$

Energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan uap air (kJ) (4)

$$Q_{bitumen} = C_{bitumen} \times m_{bitumen} \times (t_m - t_a) \dots \quad (5)$$

Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan bitumen (kJ) (5)

Metodologi ini dibagi menjadi empat tahap (Gambar 4). Tahap pertama terdiri atas tinjauan studi yang terkait dengan proyek, dikombinasikan dengan kunjungan ke berbagai pabrik pencampuran aspal untuk menjadi akrab dengan setiap tahap yang terlibat dalam proses pembuatan untuk menentukan yang paling variabel yang signifikan.

Dengan  $C_{agg}$  adalah panas spesifik agregat (J/(kg°C));  $m_{agg}$  adalah massa agregat (kg);  $t_a$  adalah temperatur lingkungan (°C);  $C_w$  adalah panas spesifik air (J/(kg°C));  $W_{agg}$  adalah kadar air agregat (%);  $L_v$  adalah panas laten penguapan air (J/(kg°C));  $C_v$  adalah panas spesifik uap (J/(kg°C));  $t_m$  adalah suhu pencampuran (°C); dan  $Q_{bitumen}$  adalah panas spesifik bitumen (J/(kg°C)).

Parameter yang terlibat dalam perhitungan konsumsi energi dapat dilihat pada Tabel 1. Temperatur lingkungan yang digunakan adalah rata-rata temperatur lingkungan di Provinsi lampung yang dapat dilihat pada Tabel 2. Pada tahap ini energi yang dibutuhkan pada teknologi WMA divariasikan menurut temperatur pencampuran pada teknologi WMA terdapat pada Tabel 3.

Untuk mengetahui kebutuhan bahan bakar diesel pada 1.000 kg WMA atau HMA pada proses pencampuran pada HMA dan teknologi di AMP dengan efisiensi AMP 35% menggunakan persamaan berikut (Meor Othman Hamzah 2010) (Cassis 1985)(6)

$$Diesel = \frac{Q \times f_{diesel} \times Filter}{\eta_{AMP}} \dots \quad (6)$$

Diesel adalah kebutuhan bahan bakar selama proses pencampuran (liter); Q adalah energi yang dibutuhkan untuk memanaskan campuran aspal (J/(kg°C));  $f_{diesel}$  adalah faktor konversi energi menjadi kebutuhan diesel (0,0068333870);  $\eta_{AMP}$  adalah efisiensi AMP di Provinsi Lampung (35%)

Emisi yang dihasilkan dengan mengalikan koefisien konversi bahan bakar dengan emisi (Wu, et al. 2021).

Perhitungan emisi yang dihasilkan selama fase pencampuran menggunakan persamaan (7) (Utari Ayuningtyas 2021).

Dengan GHG adalah emisi yang dihasilkan selama proses pencampuran (kgCO<sub>2</sub>); FGHG adalah faktor konversi GHG terhadap konsumsi bahan bakar solar berdasarkan Tabel 5 (2,70553); Diesel adalah konsumsi bahan bakar selama proses pencampuran (liter).

Biaya bahan bakar yang dibutuhkan pada peroses pencampuran HMA dan WMA dipengaruhi oleh kebutuhan bahan bakar dan harga bahan bakar di Provinsi Lampung. Harga bahan bakar di Provinsi Lampung dapat dilihat pada Tabel 4. Bahan bakar yang digunakan adalah jenis HSFO. Untuk mengetahui biaya bahan bakar yang dibutuhkan pada proses pencampuran menggunakan persamaan (8)

Keterangan:

*Biaya Diesel* = Biaya bahan bakar (Rp)

Diesel = Konsumsi bahan bakar (liter)

*Harga HESO* = Harga HESO (Rp 15.500)

Kementerian Keuangan RI telah mencatat sejarah baru mengenai dukungan perubahan iklim dunia. Undang-Undang Harmonisasi Peraturan Perpajakan (UU HPP) resmi menetapkan pajak karbon pada 7 Oktober 2021. Sektor pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan batu bara akan dikenakan pajak karbon dengan tarif sebesar Rp30,00/kgGHG. Mekanisme pajak ini didasarkan pada batas emisi dan dikenakan pajak.

Harga penghematan pajak emisi juga menjadi pertimbangan dalam menentukan opsi yang dipilih. Persamaan yang digunakan untuk menghitung penghematan kerugian emisi penggunaan WMA dibanding HMA menggunakan persamaan berikut:

*Penghematan biaya emisi = Penghematan Emisi WMA × Pajak Emisi.....(9)*

*Impact Assessment*

Pengurangan energi yang diperoleh pada campuran HMA dan WMA dihitung menggunakan persamaan berikut:

Keterangan:

Pengurangan $Q$	= Pengurangan energi (J)
$Q_{HMA}$	= Kebutuhan energi HMA (J)
$Q_{WMA}$	= Kebutuhan energi WMA (J)

Untuk mengetahui penghematan bahan bakar penggunaan teknologi WMA dibanding HMA digunakan persamaan (11)

#### Keterangan:

*Penghematan Diesel* = Penghematan bahan Bakar  
(liter)

$Diesel_{HMA}$  = konsumsi bahan bakar HMA (liter)

$Diesel_{WMA}$  = konsumsi bahan bakar WMA (liter)

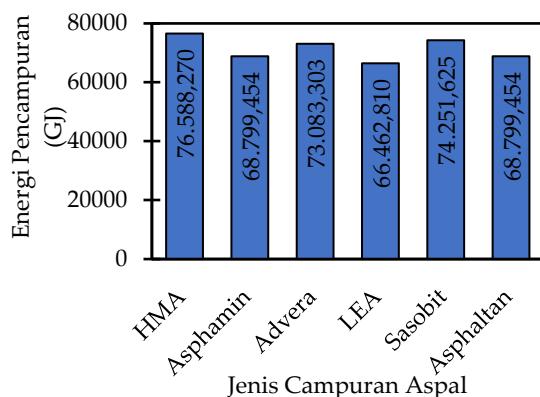
Nilai pengurangan GHG pada produksi GHG penggunaan teknologi WMA dibanding HMA menggunakan persamaan (12)

Dengan pengurangan GHG adalah pengurangan GHG pada setiap jenis WMA dibandingkan HMA (kgCO<sub>2</sub>); % GHG<sub>WMA</sub> adalah GHG yang dihasilkan pada proses pencampuran WMA (kgCO<sub>2</sub>); GHG<sub>HMA</sub> adalah GHG yang dihasilkan pada proses pencampuran HMA (kgCO<sub>2</sub>).

## HASIL DAN ANALISIS

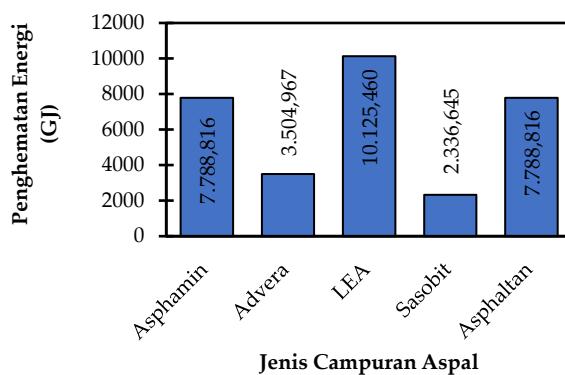
Energi

Pada bagian ini, hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel. Seluruh nilai pada Gambar 5-Gambar 9 ditunjukkan relatif terhadap HMA sebagai *baseline* atau acuan sehingga terlihat jelas besarnya penghematan energi, pengurangan emisi, dan efisiensi biaya dari setiap teknologi WMA tanpa menjelaskan nilai HMA secara eksplisit. Penelitian menunjukkan bahwa WMA secara signifikan mengurangi konsumsi energi dibandingkan dengan HMA. Pengurangan konsumsi energi pada proses pencampuran WMA dibandingkan dengan HMA disebabkan oleh temperatur pencampuran WMA di *Asphalt Mixing Plant* (AMP) yang lebih rendah sehingga mengurangi kebutuhan bahan bakar untuk pemanasan. Penjelasan konsumsi energi pada HMA dan WMA pada proses pencampuran di AMP tercantum dalam gambar berikut:



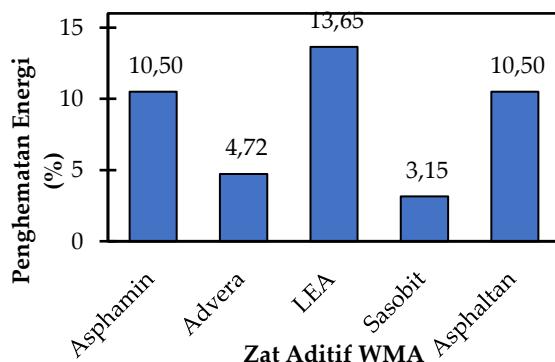
Gambar 5. Grafik Energi Pengcampuran Perbaikan Jalan Provinsi

Penjelasan pengurangan konsumsi energi pada WMA pada proses pencampuran di AMP dibanding



Gambar 6. Grafik Penghematan Energi Penggunaan WMA Dibanding HMA Pada Perbaikan Jalan Provinsi

Penjelasan persentase pengurangan konsumsi energi pada WMA pada proses pencampuran di AMP dibanding HMA tercantum dalam gambar berikut:

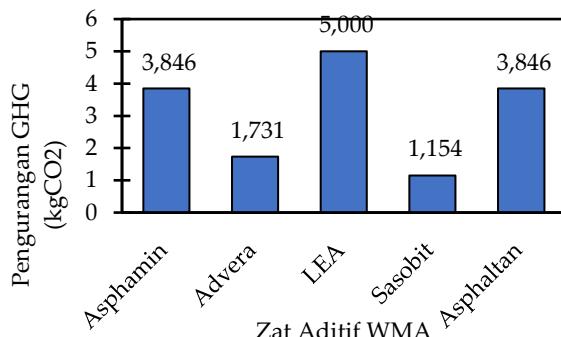


Gambar 7. Grafik Persentase Pengurangan Energi Setiap Jenis WMA Dibanding HMA

#### Efek Rumah Kaca

Penelitian menunjukkan bahwa proses perkerasan lentur, baik pada HMA maupun WMA, menghasilkan emisi GHG yang signifikan, terutama dari produksi material, pencampuran, dan konstruksi. WMA mengurangi emisi GHG dibandingkan HMA

karena kebutuhan bahan bakar yang lebih rendah dalam proses pencampuran. Perhitungan emisi dilakukan dengan mengalikan konsumsi bahan bakar dengan koefisien konversi untuk CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan N<sub>2</sub>O. Penjelasan pengurangan GHG setiap campuran WMA dibanding HMA tercantum dalam gambar berikut:

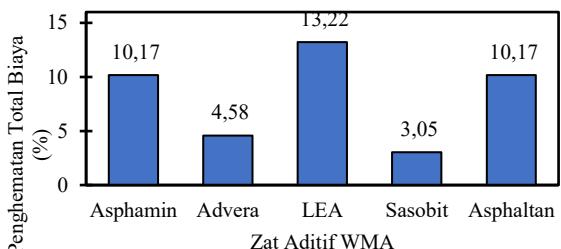


Gambar 8. Grafik Pengurangan GHG Setiap Campuran WMA dibanding HMA

Gambar 8 menunjukkan bahwa seluruh campuran WMA memiliki pengurangan emisi GHG dibandingkan HMA, dengan aditif LEA memberikan penurunan terbesar. Hasil penelitian ini konsisten dengan studi Daniel, *et al.* (2023) yang menegaskan bahwa perbedaan skala produksi turut memengaruhi besaran emisi CO<sub>2</sub>, dimana produksi skala industri menghasilkan emisi lebih tinggi dibandingkan skala laboratorium. Dengan demikian, baik jenis teknologi campuran maupun skala produksi merupakan faktor penting yang harus diperhitungkan dalam evaluasi dampak lingkungan pada konstruksi jalan.

#### Penghematan Biaya

Penelitian menunjukkan bahwa analisis total biaya dalam LCA menunjukkan bahwa WMA mengurangi biaya lebih signifikan dibandingkan HMA. Penghematan biaya pada WMA disebabkan oleh kebutuhan bahan bakar yang lebih rendah pada proses pencampuran. Penjelasan Persentase Penghematan Total Biaya Tiap Jenis WMA Dibanding HMA tercantum dalam gambar berikut:



Gambar 9. Grafik Persentase Penghematan Total Biaya Tiap Jenis WMA Dibanding HMA

## PEMBAHASAN

### Energi

Fokus diskusi adalah efisiensi energi yang dihasilkan oleh penggunaan WMA dengan berbagai zat aditif dibandingkan dengan HMA. Data yang ada menunjukkan bahwa pencampuran WMA menurunkan konsumsi energi, sesuai dengan tujuan utamanya untuk mengurangi penggunaan energi dan emisi karbon. Selain itu, berbagai zat aditif yang ada pada WMA, termasuk Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, dan Asphaltan, memengaruhi tingkat efisiensi energi yang dicapai.

Berdasarkan Gambar 5. Didapatkan data HMA membutuhkan energi pencampuran sebesar 76.588.269,878 MJ. Sementara itu, setiap jenis WMA dengan zat aditif berbeda menunjukkan kebutuhan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan HMA. WMA dengan aditif Asphamin membutuhkan 68.799.454,241 MJ, Advera sebesar 73.083.302,842 MJ,

LEA sebesar 66.462.809,550 MJ, Sasobit sebesar 74.251.625,187 MJ, dan Asphaltan sebesar 68.799.454,241 MJ. energi yang dibutuhkan untuk pencampuran dengan WMA lebih rendah daripada HMA, yang sejalan dengan tujuan penggunaan WMA, yaitu untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon.

Berdasarkan Gambar 6, penggunaan WMA menunjukkan penghematan energi yang berbeda-beda dalam setiap zat aditif pada perbaikan jalan di Provinsi Lampung. WMA dengan aditif Asphamin 7.788.815,637 MJ, Advera sebesar 3.504.967,037 MJ, LEA sebesar 10.125.460,328 MJ, Sasobit sebesar 2.336.644,691 MJ, dan Asphaltan sebesar 7.788.815,637 MJ. Dengan demikian, penerapan WMA dengan berbagai zat aditif ini dapat menghasilkan penghematan energi dalam kegiatan perbaikan jalan. Aditif yang paling tinggi dalam hal penghematan energi adalah LEA, dengan penghematan energi sebesar 10.125.460,328 MJ.

Berdasarkan Gambar 7, dalam proses pencampuran 1.000 kilogram WMA dengan zat aditif Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, dan Asphaltan, memiliki suhu pencampuran serta pengurangan energi yang berbeda-beda. Untuk WMA dengan aditif Asphamin, suhu pencampuran adalah 135°C dengan pengurangan energi sebesar 10,50%. Zat aditif Advera menghasilkan suhu pencampuran 146°C, dengan pengurangan energi sebesar 4,72%. Sementara itu, WMA dengan aditif LEA memiliki suhu pencampuran terendah, yaitu 129°C, dan memberikan pengurangan energi terbesar sebesar 13,65%. Zat aditif Sasobit memiliki suhu pencampuran tertinggi 149°C dan memberikan pengurangan energi sebesar terendah sebesar 3,15%. Zat aditif Asphaltan memiliki suhu pencampuran 135°C, menghasilkan pengurangan energi 10,50%. Hal ini menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan HMA, penggunaan WMA dengan berbagai zat aditif dapat mengurangi konsumsi energi selama proses pencampuran. Penghematan energi bervariasi bergantung pada jenis aditif dan suhu yang digunakan.

#### Efek Rumah Kaca

Jika dibandingkan dengan HMA, proses pencampuran WMA dengan berbagai zat aditif memiliki potensi besar untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GHG). Teknologi ini akan menghemat energi dan mengurangi jejak karbon dengan bekerja pada suhu lebih rendah. Setiap zat aditif, termasuk Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, dan Asphaltan, akan menjelaskan bagaimana mereka mendukung efisiensi lingkungan.

Gambar 8 menunjukkan bahwa proses pencampuran 1.000 kg untuk setiap jenis WMA dengan zat aditif Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, dan Asphaltan berpotensi mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GHG). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa campuran HMA menghasilkan emisi sebesar 37,82 kgCO<sub>2</sub> per ton campuran. Seluruh jenis *Warm Mix Asphalt* (WMA) memberikan pengurangan emisi dibandingkan HMA. Aditif Asphamin dan Asphaltan sama-sama menurunkan emisi sebesar 3,846 kgCO<sub>2</sub> atau sekitar 10,17% dari nilai HMA. Aditif Advera menurunkan emisi sebesar 1,731 kgCO<sub>2</sub> atau sekitar 4,58%, sedangkan Sasobit hanya mengurangi 1,154 kgCO<sub>2</sub> atau sekitar 3,05%. Pengurangan tertinggi dicapai oleh LEA, yang mampu menurunkan emisi hingga 5,00 kgCO<sub>2</sub>, setara dengan 13,22% dibandingkan HMA. Berdasarkan data tersebut didapatkan bahwa penambahan WMA dengan zat aditif dapat membantu mengurangi emisi karbon dan menurunkan emisi gas rumah kaca. WMA dengan aditif LEA mengurangi emisi gas rumah kaca paling banyak, yaitu 5.000 kgCO<sub>2</sub> per 1.000 kg pencampuran dengan penurunan 13,22%.

#### Penghematan Biaya

Analisis biaya untuk proses pencampuran WMA dengan berbagai zat aditif dibandingkan dengan HMA adalah salah satu komponen penting dalam mengevaluasi efisiensi teknologi ini. Setiap jenis aditif yang digunakan pada WMA mempengaruhi biaya total pencampuran, yang menunjukkan bahwa penggunaan teknologi ini dapat menghasilkan keuntungan. Teknologi WMA tidak hanya bertujuan untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon, tetapi juga menawarkan solusi konstruksi jalan yang lebih hemat biaya dengan mempertimbangkan variabilitas biaya yang dihasilkan oleh setiap aditif.

Berdasarkan Gambar 9, pada proses pencampuran 1.000 kg untuk setiap jenis WMA dengan zat aditif Asphamin, Advera, LEA, Sasobit, dan Asphaltan, dibandingkan dengan HMA, berpotensi untuk menghemat total biaya. WMA dengan aditif Asphamin berpotensi menghemat biaya sebesar 10,17%. Aditif Advera menghasilkan penghematan biaya sebesar 4,58%. Aditif LEA menghasilkan penghematan biaya sebesar 13,22%. Aditif Sasobit menghasilkan penghematan biaya sebesar 3,05%, sedangkan Asphaltan berpotensi menghemat biaya sebesar 10,17%. LEA menghasilkan penghematan biaya terbesar, 13,22% dibandingkan dengan HMA.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Wu *et al.* (2021) yang menunjukkan bahwa penggunaan WMA mampu menurunkan emisi CO<sub>2</sub> rata-rata sebesar 66,89%, tanpa mengurangi performa teknis campuran seperti *modulus dinamis* dan *rutting resistance*. Dalam studi ini, penurunan emisi tertinggi sebesar 13,22% dicapai dengan aditif LEA, yang meskipun lebih rendah, tetapi signifikan secara regional karena mempertimbangkan parameter lokal seperti harga energi dan kondisi iklim Indonesia.

Sementara itu, Floody *et al.* (2020) menyebutkan adanya penghematan energi sebesar 5–13% dan penurunan CO<sub>2</sub> hingga 23%, atau lebih tinggi jika menggunakan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Hasil penelitian ini berada dalam kisaran yang sama, dengan efisiensi energi hingga 13,22% dan penghematan biaya terbesar juga pada aditif LEA. Berbeda dari Floody et al. yang menyatakan bahwa WMA cenderung lebih mahal tanpa RAP, studi ini justru menunjukkan bahwa WMA dapat lebih hemat biaya, bahkan tanpa bahan daur ulang.

Dengan demikian, hasil studi ini konsisten dengan literatur global dan menegaskan bahwa teknologi WMA tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga layak secara ekonomi dan teknis, terutama dalam konteks lokal Indonesia.

#### Interpretasi Hasil dan Manfaat

Penggunaan *Warm Mix Asphalt* (WMA) dengan berbagai zat aditif terbukti lebih efisien dibandingkan *Hot Mix Asphalt* (HMA), baik dari segi energi, emisi gas rumah kaca, maupun biaya. Secara keseluruhan, teknologi WMA memungkinkan pencampuran aspal pada suhu yang lebih rendah sehingga menghemat energi dan mengurangi emisi karbon (Alizadeh, Hajikarimi and Nejad 2025). Dari data yang ditampilkan, aditif seperti LEA memberikan hasil terbaik dalam semua aspek: penghematan energi paling tinggi, emisi CO<sub>2</sub> paling rendah, dan penghematan biaya paling besar. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan WMA, terutama dengan aditif yang tepat, bukan hanya memberikan keuntungan teknis, tetapi juga mendukung pembangunan infrastruktur jalan yang lebih ramah lingkungan, hemat energi, dan berkelanjutan.

Selain dari segi efisiensi energi dan emisi, penggunaan *warm mix asphalt* (WMA) juga memiliki keunggulan praktis dalam pelaksanaan di lapangan. Suhu pencampuran dan pemadatan yang lebih rendah membuat proses konstruksi menjadi lebih aman dan nyaman bagi pekerja, beberapa jenis WMA juga memungkinkan waktu buka lalu lintas yang lebih cepat dibandingkan HMA (Sagar, Venudharan and Saha 2025). Untuk menjamin keberlanjutan penggunaan WMA, penting dilakukan *monitoring* kekuatan jangka panjang, seperti ketahanan terhadap retak dan deformasi, guna memastikan performanya tetap optimal seiring waktu (Alizadeh, Hajikarimi and Nejad 2025).

Meskipun hasil perhitungan menunjukkan bahwa penggunaan WMA memberikan keuntungan signifikan dari segi lingkungan dan ekonomi, implementasinya di lapangan tentu memerlukan pertimbangan teknis lebih lanjut, seperti kesiapan *Asphalt Mixing Plant* untuk adaptasi suhu pencampuran yang lebih rendah, ketersediaan zat aditif, serta dukungan regulasi yang mendorong penggunaan teknologi ramah lingkungan ini.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan Warm Mix Asphalt (WMA) mampu menurunkan suhu pencampuran sekaligus menghemat energi. Besarnya penghematan energi yang dihasilkan bervariasi antara 3,15% hingga 13,65%, dengan aditif LEA memberikan penghematan energi tertinggi sebesar 13,65% dibandingkan dengan Hot Mix Asphalt (HMA). Selain itu, setiap jenis WMA memiliki potensi untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GHG), di mana pengurangan emisi terbesar juga ditunjukkan oleh

WMA dengan aditif LEA, yaitu sebesar 5,00 kgCO<sub>2</sub> per ton campuran atau setara dengan penurunan sebesar 13,22% dibandingkan HMA. Dari sisi ekonomi, penerapan WMA menunjukkan potensi penghematan biaya total produksi, dengan kisaran penghematan antara 3,05% hingga 13,22%, dan kembali, aditif LEA memberikan penghematan biaya terbesar sebesar 13,22% dibandingkan dengan HMA.

### Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran dapat disampaikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Penelitian serupa perlu dilakukan di lokasi dengan kondisi iklim dan geografis yang lebih beragam, serta dilengkapi dengan analisis emisi polutan lain selain gas rumah kaca (GHG), seperti PM2.5 dan NOx, guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap dampak lingkungan. Selain itu, diperlukan analisis dampak ekonomi penggunaan Warm Mix Asphalt (WMA) dibandingkan dengan Hot Mix Asphalt (HMA) dalam skala yang lebih besar, termasuk evaluasi biaya perawatan jangka panjang dan pelaksanaan pengujian lapangan untuk memperoleh data yang lebih akurat terkait kinerja WMA. Selanjutnya, peluang pemanfaatan teknologi baru dalam produksi WMA, seperti teknologi nano atau penggunaan aditif ramah lingkungan, perlu dikaji lebih lanjut, serta dilakukan perbandingan WMA dengan teknologi perkerasan lainnya untuk menemukan solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera yang telah menyediakan dana penelitian ini melalui "Hibah Penelitian Itera 2024". Penulis juga menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan dan saran berharga selama proses penelitian. Meskipun penulis telah berusaha sebaik mungkin, mohon maaf apabila jurnal hasil penelitian ini masih mengandung kekurangan.

## DAFTAR PUSTAKA

Alejandra T. Calabi-Floody, Gonzalo A. Valdés-Vidal, Elsa Sanchez-Alonso, and Luis A. Mardones-Parra. 2020. "Evaluation of Gas Emissions, Energy Consumption and Production Costs of Warm Mix Asphalt (WMA) Involving Natural Zeolite and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)." *Sustainability*.

Alfaridzi, Rifki. 2024. *SHA Foundation*.

- Alizadeh, Mohsin, Pouria Hajikarimi, and Fereidoon Moghadas Nejad. 2025. "Advancing asphalt mixture sustainability: A review of WMA-RAP integration." *Results in Engineering* 1-18.
- Ana María Rodríguez-Alloza, Arunima Malik, Manfred Lenzen, Juan Gallego. 2015. "Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures." *Journal of Cleaner Production*.
- Cassis, R. & Fuller, N. & Hepler, L. & McLean, Robert & Srinivasen, N. & Yan, H. & Skauge, Arne. 1985. "Specific Heat Capacities of Bitumen and Heavy oils, Reservoir Minerals, Clays, Dehydrated Clays, Asphaltenes, and Cokes." *AOSTRA Journal of Research*.
- Daniel, Christian Gerald, M. Rifqon, Fadhil M. Firdaus, and Khairina A. Canny. 2023. "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-Modifie)." *Jurnal Jalan-Jembatan* 40: 17-31.
- Daniela Vega-Araujoa, Gilberto Martinez-Arguelles, João Santos. 2020. "Comparative life cycle assessment of warm mix asphalt with recycled concrete aggregates: A Colombian case study." *ScienceDirect*.
- Hao Wang, Israa Al-Saadi, Pan Lu & Abbas Jasim. 2019. "Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment." *International Journal of Sustainable Transportation*.
- Huayang, YU. 2017. *APPLICATION OF WARM ASPHALT RUBBER AS A SUSTAINABLE PAVING MATERIAL: COMPONENT INTERACTION MECHANISM INVESTIGATION AND PERFORMANCE CHARACTERIZATION*. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University Department of Civil and Environmental Engineering.
- Hui Ma, Zhigang Zhang, Xia Zhao, Shuang Wu. 2019. "A Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Warm Mix Asphalt (WMA) and Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement: A Case Study in China." *Hindawi Advances in Civil Engineering*.
- Ismael, Mohammed Qadir, and Reem Fouad Ahmed Al-Harjan. 2018. "Evaluation of Job-Mix Formula Tolerances as Related to Asphalt Mixtures Properties." *Journal of Engineering* 124-144.
- Jasim, Zaineb M., Miami M. Hilal, Shatha S. Hasan, and Mohammed Y. Fattah. 2024. "Warm Mix Asphalt (WMA) Techniques: Advantages and Disadvantages - A Review." *The 5th International Conference on Buildings, Construction, and Environmental Engineering* 1-21.
- Meor Othman Hamzah, Ali Jamshidi, Zulkurnain Shahadan. 2010. "Evaluation of the potential of Sasobit to reduce required heat energy and CO<sub>2</sub> emission in the asphalt industry." *Journal of Cleaner Production*.
- Sagar, K.M. Arun, Veena Venudharan, and Gourab Saha. 2025. "Prospects of warm mix asphalt in maximizing reclaimed asphalt pavement utilization: Review on mix design and performance." *Cleaner Waste Systems* 1-18.
- Sarasputri, Dwi Ajeng. 2022. "Life Cycle Assessment Perkerasan Jalan Beraspal Dengan Reclaimed Asphalt Pavement Di Ruas Jalan Nasional Provinsi Jawa Barat (Life Cycle Assessment Of National Road With Reclaimed Asphalt Pavement In West Java Province)." *Jurnal Jalan-Jembatan* 39: 137-149.
- Siyuan Xu, Feipeng Xiao, Serji Amirkhanian, Dharamveer Singh. 2017. "Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies." *Construction and Building Materials*.
- Thives, L.P., and E. Ghisi. 2017. "Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Utari Ayuningtyas, Mohamad Yani, n Siti Maimunah. 2021. *LIFE CYCLE ASSESSMENT PENGGUNAAN BAHAN BAKAR, REFRIGERAN AN ENERGI LISTRIK PADA TRANSJAKARTA*. Tangerang Selatan: Pusat Riset dan Pengembangan Sumber Daya Manusia.
- Wu, Shenghua, Omar Tahri, Shihui Shen, Weiguang Zhang, and Balasingam Muhunthan. 2021. "Environmental impact evaluation and long-term rutting resistance performance of warm mix asphalt technologies." *Journal of Cleaner Production* 1-9.
- Xiao, Feipeng , Wenbin Zhao, Tejash Gandhi, and Serji N. Amirkhanian. 2010. "Influence of Antistripping Additives on Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt Mixtures." *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING* 22: 1047-1055.