

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)

Dwi Ajeng Sarasputri

Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional DKI Jakarta – Jawa Barat
Jl. A. H. Nasution No. 264, Sidanglaya, Kota Bandung, Jawa Barat 40294
e-mail: ajengsarasputri@pu.go.id

Diterima: 14 September 2022 ; direvisi: 01 Desember 2022; diterbitkan online: 30 Desember 2022.

ABSTRAK

Dalam rangka mencapai pembangunan berkelanjutan pada peningkatan kualitas jalan nasional diperlukan strategi yang optimal, salah satu upaya yang telah dikembangkan adalah minimisasi limbah agregat akibat produksi perkerasan jalan beraspal dengan penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak lingkungan yang diakibatkan oleh penerapan teknologi perkerasan jalan RAP melalui metode Life Cycle Assessment (LCA) dengan software OpenLCA dan metode analisa dampak Recipe 2016 Midpoint (H) serta menganalisis komponen kegiatan yang berkontribusi tinggi terhadap dampak. Objek yang diteliti adalah pekerjaan rehabilitasi jalan beraspal di ruas jalan nasional Provinsi Jawa Barat dalam unit fungsi 1 km jalan beraspal dengan lebar 3,5 m. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut didapatkan hasil bahwa penggunaan 50% kadar RAP pada 1 km jalan beraspal dapat menurunkan dampak global warming (GWP) sebesar 1,05 ton CO₂ eq, fossil resource scarcity (FRS) sebesar 19,60 ton oil eq, human carcinogenic toxicity (HCT) sebesar 0,25 ton 1,4-DCB, dan human non-carcinogenic toxicity (HnCT) sebesar 1,79 ton 1,4-DCB dibandingkan tanpa penggunaan RAP, sedangkan dampak fine particulate matter formation (PM) pada aspal dengan 50% RAP lebih tinggi 0,02 ton PM_{2,5} eq dibandingkan aspal tanpa RAP. Pembakaran diesel pada proses produksi menjadi kegiatan utama yang menyumbangkan emisi terbesar pada mayoritas dampak, dan upaya efisiensi bahan bakar dapat menurunkan dampak secara keseluruhan sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan untuk penerapan RAP di jalan nasional.

Kata Kunci: *life cycle assessment, reclaimed asphalt pavement, aspal hotmix, jalan, recipe2016, OpenLCA*

ABSTRACT

In order to achieve sustainable development in improving the quality of national roads, an optimal strategy is required. The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) has been developed as an effort to minimize aggregate waste due to asphalt pavement production. This study aims to estimate the environmental impact caused by the application of RAP road pavement technology through Life Cycle Assessment (LCA) with OpenLCA software and Recipe 2016 Midpoint (H) method and to analyze the components of activities that contribute the most to the impact. The case study is rehabilitation project of national asphalt roads in West Java Province with 1 km asphalt road functional unit. The result of this study shows that the use of 50% RAP levels can reduce the impact of global warming (GWP) of 1,05 ton CO₂ eq, fossil resource scarcity (FRS) of 19,60 ton oil eq, human carcinogenic toxicity (HCT) of 0,25 ton 1,4-DCB, and human non-carcinogenic toxicity (HnCT) of 1,79 ton 1,4-DCB compared to asphalt without RAP, while the impact of fine particle formation on asphalt with 50% RAP is 0,02 ton PM_{2,5} eq higher than asphalt without RAP. Diesel in production process is the main activity that contributes the largest emissions to most impacts, and fuel efficiency efforts can reduce the overall impact that its result can be taken into consideration for the implementation of RAP on national roads.

Key words: *life cycle assessment, reclaimed asphalt pavement, hot mix asphalt, road, recipe2016, OpenLCA*

PENDAHULUAN

Dalam upaya untuk mempertahankan kualitas jalan yang merupakan prasarana konektivitas antar wilayah dan aktivitas ekonomi masyarakat, peningkatan kinerja pelayanan jalan nasional selalu dilakukan oleh pemerintah Indonesia. Sebagai gambaran, pada tahun 2020 panjang jalan nasional yang terpelihara di Provinsi Jawa Barat mencapai 1.963,55 km (Direktorat Jenderal Bina Marga 2021). Di sisi lain, tingginya kebutuhan peningkatan infrastruktur jalan dapat berpengaruh terhadap ketergantungan sumber daya alam tidak terbarukan, salah satunya adalah agregat yang merupakan bahan utama penyusun aspal. Total konsumsi agregat secara global mencapai lebih dari 15 miliar ton per tahun, dimana kandungan agregat tersebut berkisar antara 75 – 85% dari volume campuran perkerasan beraspal (Martinez-Arguelles et al. 2019). Sebagai salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan agregat alami telah banyak dikembangkan *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*, yaitu pemanfaatan bahan dari perkerasan beraspal lama yang sudah mengalami kerusakan kemudian digunakan kembali sebagai bahan campuran beraspal baru untuk perbaikan perkerasan jalan (Nono 2018).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RAP memberikan dampak lingkungan yang lebih rendah. Penggunaan RAP sebesar 25% berpotensi menurunkan dampak lingkungan sebesar 19% untuk keseluruhan daur hidup pekerjaan aspal yang terdiri dari konstruksi, pemeliharaan dan rehabilitasi (Vandewalle et al. 2020). Namun jika meninjau penggunaan RAP terhadap konsumsi energi, diketahui bahwa semakin tinggi kadar RAP terjadi konsumsi energi dan emisi CO₂ yang semakin besar khususnya pada tahap rehabilitasi yang mencakup pengerukan, penghamparan dan pemadatan aspal, dimana kadar 40% RAP menghasilkan emisi CO₂ terbesar. Hal ini disebabkan karena tingginya jumlah energi yang dibutuhkan untuk mendapatkan kualitas perkerasan jalan yang baik, walaupun secara keseluruhan mampu menurunkan total energi hingga 30% (Ashtiani 2020).

Kegiatan konstruksi jalan dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia akibat adanya pelepasan polutan di atmosfer dari berbagai proses konstruksi (Giunta 2020). Dampak lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan pemeliharaan jalan harus dianalisa secara komprehensif dan kuantitatif (Ma et al., 2021). Dampak lingkungan dari perkerasan jalan dapat digambarkan dengan tepat melalui pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)* (Santero, Masanet and Horvath 2011). Melalui metode LCA dapat dilakukan analisis kuantitatif terhadap dampak lingkungan dari seluruh daur hidup sistem perkerasan jalan, karena metode ini bertujuan untuk menilai dampak lingkungan yang berkaitan dengan seluruh tahapan dari daur hidup suatu produk, *cradle to grave* (Oreto et al., 2021; Vidal et al., 2013).

Penelitian LCA terhadap perkerasan beraspal belum banyak dilakukan di Indonesia, terutama yang menggunakan *software*. Penelitian LCA yang dilakukan oleh Fistcar (2020) pada perkerasan kaku dan lentur di Jalan Tol Balikpapan – Samarinda menggunakan metode Tabel *Energy Use and GHG Emissions for Pavement Construction* dan metode konversi bahan bakar, sedangkan Sudarno, Purwanto, dan Pratikso (2013) meneliti LCA pada konstruksi *Cement Treated Recycling Base (CTRB)* melalui perhitungan konsumsi energi alat berat konstruksi. Penelitian - penelitian tersebut juga belum mengkaji kategori dampak selain gas rumah kaca. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis dampak lingkungan dan kesehatan manusia per 1 km jalan beraspal dengan agregat alami dan RAP, menganalisis pengaruh penggunaan RAP terhadap perubahan dampak, dan menganalisis proses kegiatan rehabilitasi jalan beraspal yang paling berpengaruh terhadap dampak (*hotspot*).

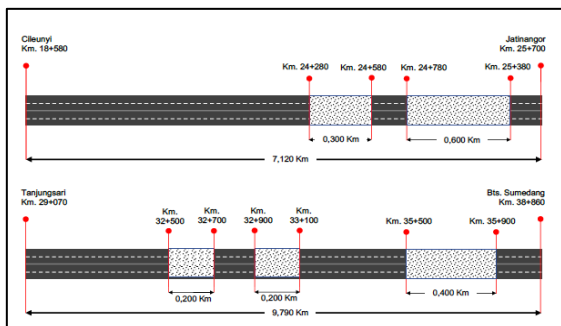
HIPOTESIS

Penggunaan RAP pada perkerasan beraspal yang dianalisis dengan metode LCA diprediksi dapat menurunkan dampak pemanasan global, pencemaran udara

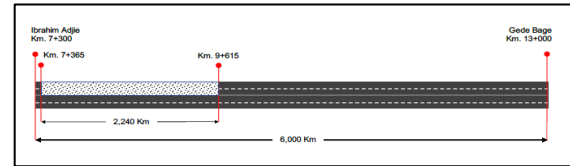
partikulat, kelangkaan sumber daya alam, dan dampak terhadap kesehatan manusia.

METODOLOGI

Provinsi Jawa Barat melalui Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional DKI Jakarta – Jawa Barat, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat telah menerapkan RAP pada perkerasan beraspal di ruas jalan nasional Soekarno – Hatta (Bdg) sepanjang 2,24 km melalui kegiatan Rehabilitasi Mayor pada Tahun Anggaran 2021. Lokasi ini diangkat menjadi objek penelitian perkerasan jalan beraspal dengan 50% kadar RAP. Sebagai pembandingan, ruas jalan lain yang masih berada di wilayah Jawa Barat (Bandung Raya) dengan jenis pekerjaan yang sama yaitu Rehabilitasi Mayor ditentukan sebagai objek penelitian kedua sebagai perkerasan beraspal tanpa RAP (0% RAP). Objek studi kedua ini berlokasi di ruas Jalan Raya Jatinangor (Jatinangor) dan ruas Jalan Jatinangor – Bts. Kota Sumedang dengan total panjang 1,70 km. Karena terdapat perbedaan spesifikasi teknis kedua objek tersebut maka dilakukan perhitungan normalisasi menjadi satuan Unit Fungsi (FU) per 1 km jalan dengan lebar lajur 3,5 meter yang disampaikan lebih lanjut pada Analisis Inventori. Rehabilitasi jalan seluruh objek studi dilakukan pada lapis AC-BC dengan ketebalan lapisan 6 cm dan lapis AC-WC dengan ketebalan lapisan 4 cm. Gambar 1 dan 2 menunjukkan *stripmap* spesifikasi teknis jalan kegiatan Rehabilitasi Mayor yang menjadi objek penelitian.

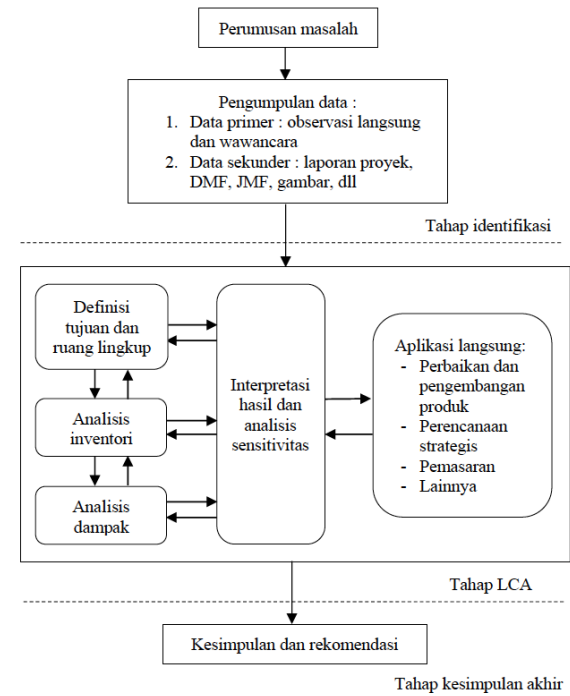


Sumber: BBPJJN DKI Jakarta – Jabar, diolah (2021)
Gambar 1. *Stripmap* Ruas Jalan 0% RAP



Sumber: BBPJJN DKI Jakarta – Jabar, diolah (2021)

Gambar 2. *Stripmap* Ruas Jalan 50% RAP



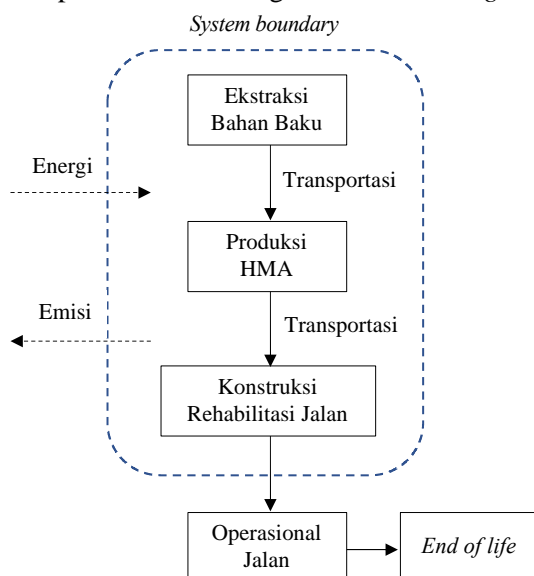
Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Pengumpulan data yang terdiri dari data primer dan sekunder yang kemudian diproses melalui metode *Life Cycle Assessment* (LCA) yang berpedoman pada ISO 14040 (SNI ISO 14040, 2016) Gambar 3, dengan menggunakan *software* dan *database*. Penelitian ini menggunakan *software* OpenLCA, yaitu perangkat lunak bebas biaya dan bersifat *open source* untuk perhitungan LCA. Melalui *software* OpenLCA, data aliran massa yang diinventarisasi terlebih dahulu kemudian diinput ke dalam beberapa proses yang menyusun sistem produk perkerasan jalan beraspal. Aliran massa tersebut diwakili oleh *database* yang telah terintegrasi di dalam *software*, dimana penelitian ini menggunakan *database* yang umum digunakan pada studi LCA bidang konstruksi yaitu Ecoinvent 3.8 dan OzLCI2019. Pengolahan *database* tersebut menghasilkan output massa dan emisi yang kemudian dikalkulasi oleh OpenLCA untuk menghasilkan besaran dampak. Nilai dampak

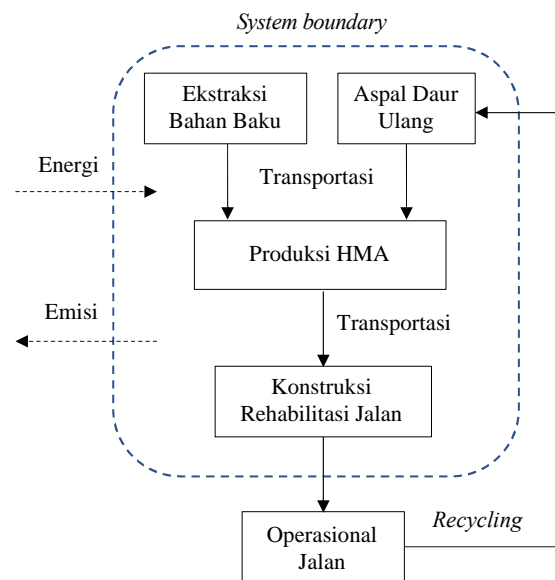
yang diperoleh kemudian diolah lebih lanjut dengan *Microsoft Excel* untuk untuk mendapatkan variasi dan keterkaitan antara dampak, proses kegiatan, dan variabel kadar aspal daur ulang.

Tujuan penelitian LCA pada perkerasan beraspal dengan RAP ini adalah untuk mengetahui dampak lingkungan pencemaran partikulat (*fine particulate matter formation*), kelangkaan sumber daya fosil (*fossil resource scarcity*), pemanasan global (*global warming*), dan toksisitas manusia karsinogenik dan non-karsinogenik (*carcinogenic and non-carcinogenic human toxicity*) dari daur hidup pekerjaan perkerasan beraspal yang menggunakan aspal alami dan aspal modifikasi daur ulang (RAP).

System Boundary penelitian LCA ini adalah dengan skema *cradle to gate* yang dimulai sejak pengambilan bahan baku agregat alami di *quarry* dan agregat daur ulang di ruas jalan eksisting, pengolahan menjadi campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt/HMA*) di lokasi pencampuran aspal (*Asphalt Mixing Plant/AMP*), sampai dengan penghamparan dan pemadatan aspal di ruas jalan nasional. Studi ini tidak mencakup tahap operasional jalan dan tahap *end of life*, sehingga analisis kondisi lalu lintas tidak diperhitungkan dalam penelitian. Gambar 4 menampilkan batasan sistem pada proses perkerasan jalan beraspal 0% RAP, sedangkan Gambar 5 menunjukkan batasan sistem pada proses perkerasan jalan beraspal 50% RAP dengan alur *cradle to gate*.



Gambar 4. Batasan Sistem Aspal 0% RAP



Gambar 5. Batasan Sistem Aspal 50% RAP

Analisis Inventori

Life Cycle Inventory (LCI) atau analisis inventori terdiri dari pengumpulan data dan pendefinisian aliran material seperti input bahan baku atau bahan bakar dan substansi seperti output emisi ke udara, air, atau tanah yang mengalir melalui unit proses pada sistem (Oreto et al., 2021). Inventori data pada penelitian ini didapatkan dari perhitungan data primer dari observasi langsung dan wawancara serta data sekunder sesuai dengan *Design Mix Formula* (DMF) dan *Job Mix Formula* (JMF) material yang digunakan untuk kedua objek studi. Data tersebut diproses lebih lanjut melalui perhitungan normalisasi untuk mendapatkan volume setiap proses per Unit Fungsi (FU) 1 km panjang jalan dengan lebar lajur 3,5 m, sehingga seluruh nilai yang dibandingkan antara kedua objek studi menjadi setara per satuan FU (Tabel 1 s/d Tabel 4). Output emisi yang dihasilkan dari setiap proses di dalam batasan sistem penelitian didapatkan dari *database* yang diolah secara otomatis dengan *software* OpenLCA sesuai dengan data inventarisasi yang diinput dan literatur. Analisis inventori dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu ekstraksi bahan baku, produksi *Hot Mix Asphalt* (HMA), konstruksi rehabilitasi jalan, dan transportasi.

Tabel 1. Data Inventori Tahap Ekstraksi Bahan Baku

Material	0% RAP	50% RAP	Satuan (FU)
Input			
Agregat	743,03	376,85	ton
Milling aspal	-	729,73	ton
Jacking aspal	-	68,41	ton
Bahan bakar diesel	-	6,57	MWh
Air	-	14,79	m ³
Output			
Agregat	743,03	376,85	ton
RAP mentah	-	798,14	ton

Proses ekstraksi bahan baku bersumber dari dua lokasi, yaitu *quarry* untuk 0% RAP dan *quarry* dan jalan eksisting untuk 50% RAP. Kedua lokasi *Quarry* yang masih berada pada wilayah Jawa Barat memiliki tipe galian dan material yang cukup serupa. Aspal di jalan eksisting yang berlokasi di Jalan Soekarno-Hatta Kota Bandung dikeruk (*milling*) dengan *cold milling machine* (CMM) dan *jack hammer* untuk proses *jacking*, sedangkan pada objek studi aspal 0% RAP tidak terdapat proses *milling* (Tabel 1). Input bahan bakar diesel sebagai sumber alat berat dikonversi ke dalam satuan energi untuk menyesuaikan kebutuhan pada perangkat lunak OpenLCA.

Produksi HMA untuk aspal 0% RAP maupun 50% RAP dilakukan di *Asphalt Mixing Plant* (AMP) dengan tipe yang sama yaitu tipe *Batch*, sehingga memiliki rangkaian proses produksi dan karakter konsumsi energi khususnya pembakaran diesel yang serupa. Proses produksi ini terdiri dari beberapa tahap seperti penyaringan, pemanasan, pengayakan, dan pencampuran agregat dengan material lain yaitu bitumen atau bahan aspal, bahan peremaja/*rejuvenator*, dan bahan anti pengelupasan/*anti stripping agent* menjadi campuran aspal panas. Yang menjadi perbedaan adalah penggunaan bahan tambahan hanya digunakan untuk aspal RAP, selain itu terdapat serangkaian proses tambahan untuk mengolah RAP mentah sehingga membutuhkan energi sedikit lebih besar. Di sisi lain terlihat bahwa aspal tanpa RAP membutuhkan bitumen yang lebih banyak (Tabel 2).

Tabel 2. Data Inventori Tahap Produksi HMA

Material	0% RAP	50% RAP	Satuan (FU)
Input			
Agregat	743,03	376,85	ton
RAP mentah	-	798,14	ton
Bitumen/Aspal	42,93	22,61	ton
Bahan peremaja/ <i>rejuvenator</i>	-	0,29	ton
<i>Anti stripping agent</i>	-	0,18	ton
Bahan bakar diesel	348,72	379,42	MWh
<i>Air wet scrubber</i>	1,25	1,14	m ³
Listrik	5,66	5,75	MWh
Output			
<i>Hot Mix Asphalt</i> (HMA)	785,96	798,14	ton
Sisa RAP mentah (<i>stockpile</i>)	-	399,92	ton
Air limbah <i>scrubber</i>	1,25	1,14	m ³

Kegiatan konstruksi yang dilakukan berupa rehabilitasi jalan beraspal pada lapis AC-BC dan AC-WC dengan total ketebalan 10 cm. Proses ini terdiri dari beberapa tahap di antaranya adalah penyemprotan *tack coat* dan *prime coat*, penghamparan aspal, dan pemadatan aspal menggunakan alat berat berbahan bakar diesel (Tabel 3). Karena kedua objek studi menerapkan jenis pekerjaan yang sama yaitu Rehabilitasi Mayor, maka proses konstruksi yang dilakukan menggunakan standar spesifikasi yang sama.

Tabel 3. Data Inventori Tahap Konstruksi Rehabilitasi Jalan

Material	0% RAP	50% RAP	Satuan (FU)
Input			
HMA	785,96	798,14	ton
<i>Tack coat/ prime coat</i>	1,75	1,40	m ³
Air	1,75	1,77	m ³
Bahan bakar diesel	19,26	19,56	MWh
Output			
Produk jalan beraspal	1,00	1,00	km
Air limbah	1,75	1,77	m ³

Tahap transportasi untuk aspal 0% RAP terdiri dari pengangkutan agregat dari *quarry* ke AMP yang berjarak sekitar 30 km dan pengangkutan HMA dari AMP ke lokasi

konstruksi yang berjarak sekitar 55 km. Sedangkan kegiatan transportasi untuk aspal 50% RAP terdiri dari pengangkutan agregat dari *quarry* ke AMP yang berjarak 6,8 km, pengangkutan hasil *milling* dari jalan eksisting ke AMP yang berjarak sekitar 43,5 km, dan pengangkutan HMA ke lokasi konstruksi yang juga berjarak 43,5 km. Inventori kegiatan transportasi dihitung dalam satuan t.km (Tabel 4).

Tabel 4. Data Inventori Tahap Transportasi

Material	0% RAP	50% RAP	Satuan (FU)
<i>Quarry</i> - AMP	22.291,03	2.562,57	t.km
Jalan eksisting - AMP	-	31.743,17	t.km
AMP - konstruksi	43.227,80	34.719,09	t.km

Metode Analisis Dampak dan Sensitivitas

Metode analisa dampak yang digunakan adalah ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang diintegrasikan di dalam *software* OpenLCA. Recipe 2016 merupakan metode yang menggabungkan beberapa pendekatan dampak lainnya dan dapat menghasilkan tingkat indikator dampak *midpoint* dan *endpoint* (Acero, Rodríguez and Citroth 2014). Analisis sensitivitas diukur dengan variasi *output* dari model perhitungan dialokasikan secara kualitatif atau kuantitatif ke sumber variasi yang berbeda pada *input*.

HASIL DAN ANALISIS

Analisis Dampak

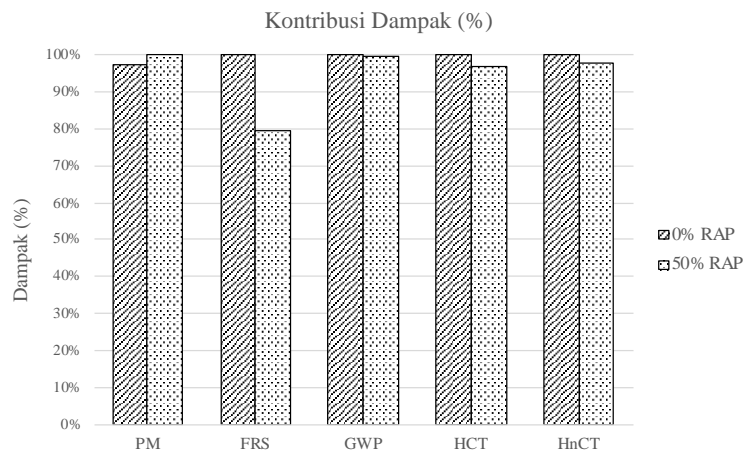
Berdasarkan perhitungan dampak dengan *software* OpenLCA dan menggunakan metode LCIA Recipe 2016 Midpoint (H), diketahui

Tabel 5. Hasil Perhitungan Dampak

Kategori Dampak	Unit	0% RAP	50% RAP
<i>Fine particulate matter formation</i> (PM)	ton PM _{2,5} eq	0,74	0,76
<i>Fossil resource scarcity</i> (FRS)	ton oil eq	96,20	76,60
<i>Global warming</i> (GWP)	ton CO ₂ eq	178,84	177,78
<i>Human carcinogenic toxicity</i> (HCT)	ton 1,4-DCB	8,05	7,80
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i> (HnCT)	ton 1,4-DCB	75,61	73,83

besaran dampak yang ditimbulkan dari daur hidup kegiatan rehabilitasi jalan beraspal baik tanpa aspal daur ulang maupun dengan RAP sebesar 50%. Analisa dampak pada penelitian ini dibatasi untuk 5 kategori dampak berdasarkan metodologi yaitu *fine particulate matter formation* (PM) dalam unit kg PM_{2,5} eq, *fossil resource scarcity* (FRS) dengan unit kg oil eq, *global warming* (GWP) dengan unit kg CO₂ eq, *human carcinogenic toxicity* (HCT) dan *human non-carcinogenic toxicity* (HnCT) dengan unit kg 1,4-DCB. Pada tingkat midpoint, emisi umumnya diekspresikan dalam massa ekuivalen terhadap substansi yang menjadi acuan pada setiap kategori dampak (Kobayashi et al. 2015). Hasil perhitungan dampak pada kelima kategori dampak tersebut ditampilkan pada Tabel 5.

Dalam LCA, hasil perhitungan dampak umumnya dikonversikan ke dalam persentase dimana beban emisi terbesar dijadikan 100% dan besaran emisi lainnya dihitung relatif terhadap beban emisi terbesar. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5 dan Gambar 6, terlihat bahwa penggunaan RAP 50% memberikan persentase dampak yang lebih rendah hampir di seluruh kategori dampak kecuali dampak PM dimana aspal tanpa RAP menunjukkan emisi PM yang lebih rendah dibandingkan aspal dengan 50% RAP. Dampak FRS memperlihatkan perbedaan yang paling besar antara 0% RAP dan 50% RAP dibandingkan kategori dampak lainnya, hal ini menunjukkan bahwa substitusi agregat alami dengan RAP dapat menurunkan dampak FRS secara signifikan. Pada 50% RAP, jumlah bitumen yang digunakan untuk campuran HMA juga semakin berkurang dibandingkan 0% RAP sehingga mempengaruhi dampak FRS yang menjadi jauh lebih rendah.



Gambar 6. Persentase Kontribusi Dampak

Penggunaan 50% RAP tidak menunjukkan penurunan dampak GWP yang cukup signifikan dibandingkan tanpa RAP, yaitu sekitar 1,06 ton CO₂ eq. Penggunaan agregat tidak terbarukan menyebabkan tingginya dampak GWP pada aspal konvensional, akan tetapi proses yang melibatkan energi tinggi pada pengolahan RAP juga memberikan pengaruh yang cukup besar pada dampak tersebut.

Analisis dampak *human toxicity* dibagi menjadi kategori *carcinogenic* dan *non-carcinogenic* yang diperbarui pada Recipe 2016. Faktor efek toksikologis manusia tersebut menggambarkan perubahan insiden penyakit seumur hidup karena adanya perubahan asupan zat tertentu. Efek emisi kimiawi terhadap *human toxicity* diekspresikan dengan faktor karakterisasi kg 1,4-dichlorobenzene-equivalents (1,4-DCB-eq) untuk tingkat midpoint (Huijbregts et al. 2017). Kedua dampak tersebut menunjukkan pola yang serupa dimana penggunaan 50% RAP dapat menurunkan dampak yaitu sekitar 1,8 ton 1,4-DCB, dengan beban dampak yang bersifat non karsinogenik lebih tinggi dibandingkan dampak karsinogenik.

Analisis Kontribusi Komponen Kegiatan

Melalui metode LCA dapat diketahui dampak dari setiap tahapan kegiatan yang termasuk ke dalam batasan sistem dan seberapa besar pengaruh dari emisi yang dihasilkan oleh setiap tahap kegiatan tersebut terhadap dampak secara keseluruhan. Gambar 7 menampilkan persentase kontribusi masing-masing komponen kegiatan yang dikelompokkan

menjadi transportasi, pembakaran diesel pada AMP dan alat berat konstruksi, penggunaan listrik, penggunaan air, dan ekstraksi bahan baku. Kegiatan yang memberikan pengaruh paling besar hampir di seluruh kategori dampak dan menjadi *hotspot* pada kegiatan perkerasan jalan beraspal baik tanpa RAP maupun dengan 50% RAP adalah penggunaan diesel pada proses pembakaran.

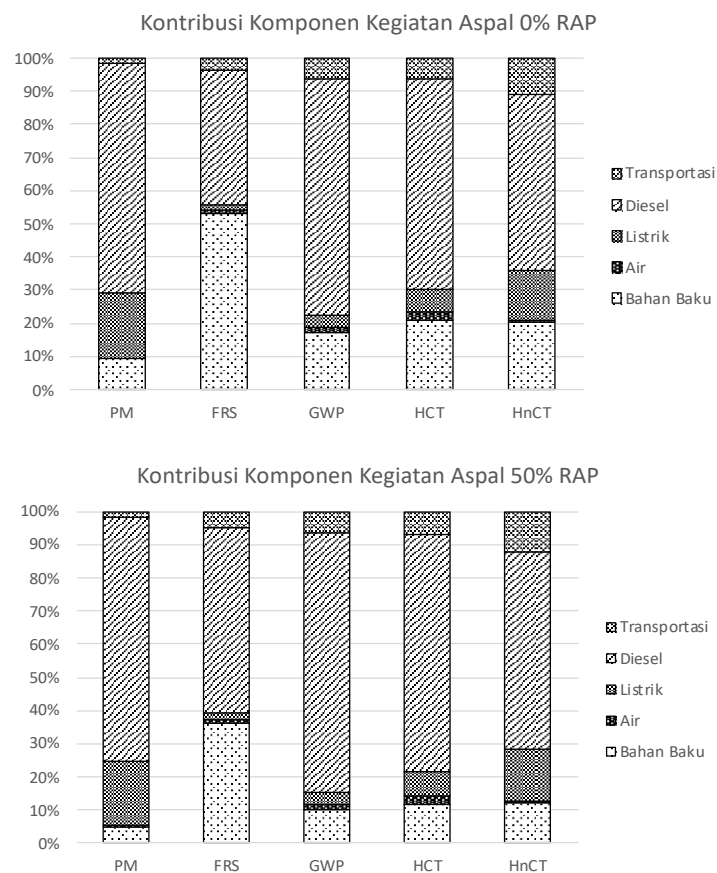
Penggunaan bahan bakar diesel terjadi pada proses produksi HMA di AMP dan pada alat berat konstruksi. Di AMP, bakar diesel terutama digunakan untuk pembakaran material agregat maupun aspal, karena sistem yang digunakan untuk pengolahan aspal pada studi ini adalah dengan metode *Hot Mix Asphalt* atau aspal campuran panas. Terlihat bahwa pembakaran *diesel* memberikan kontribusi yang dominan terutama terhadap dampak PM dan GWP. Pembakaran bahan bakar diesel juga memberikan pengaruh mayoritas pada dampak HCT dan HnCT. Beban emisi diesel tersebut lebih tinggi pada aspal 50% RAP yang diakibatkan oleh penggunaan energi diesel yang lebih besar. Sedangkan ekstraksi bahan baku memberikan dampak kesehatan manusia yang lebih tinggi pada aspal 0% RAP akibat emisi yang ditimbulkan dari serangkaian proses yang dilakukan untuk menghasilkan agregat, bitumen, dan bahan lainnya.

Penggunaan listrik cukup berpengaruh terhadap dampak PM dan HnCT, namun cukup rendah terhadap dampak lainnya. Berbeda dengan pola indikator komponen kegiatan pada kategori dampak secara umum, dampak FRS terutama dipengaruhi oleh kegiatan ekstraksi bahan baku terutama pada aspal 0% RAP.

Tingginya pemanfaatan bitumen dan agregat alami sebagai bahan utama penyusun aspal dapat menyebabkan kelangkaan sumber daya tidak terbarukan.

Secara umum, kegiatan transportasi tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada dampak yang dikaji. Transportasi terjadi antara *quarry* dan jalan eksisting dengan AMP serta antara AMP dengan lokasi konstruksi rehabilitasi jalan. Pengangkutan material untuk aspal 0% RAP menggunakan dua jenis kendaraan, yaitu truk *colt diesel* berkapasitas 12 ton dan menempuh jarak sekitar 30 km, serta *dumptruck* yang berkapasitas 30 ton dan menempuh jarak sekitar 55 km, dimana *colt*

diesel memberikan dampak yang lebih rendah dari transportasi dengan *dumptruck*. Dampak akibat kegiatan transportasi pada aspal 50% RAP lebih besar karena adanya pengangkutan hasil *milling* aspal dari jalan eksisting menuju AMP untuk diolah menjadi aspal daur ulang dengan jarak sekitar 43,5 km sama dengan transportasi sebaliknya yaitu dari AMP ke lokasi konstruksi rehabilitasi, karena jalan yang didaur ulang dan di rehabilitasi berada di ruas yang sama. Kegiatan transportasi akan lebih efisien dan rendah emisi apabila tidak seluruh hasil *milling* dibawa ke AMP atau jika terdapat AMP atau *stockpile* yang terletak lebih dekat dengan ruas jalan tersebut



Gambar 7. Kontribusi Komponen Kegiatan terhadap Dampak

PEMBAHASAN

Interpretasi Hasil

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kegiatan perkerasan jalan beraspal yang dimulai dari ekstraksi bahan baku hingga konstruksi rehabilitasi jalan nasional memberikan dampak pemasangan global sebesar 178,84 ton CO₂ eq, sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil penelitian Fistcar (2020) pada

implementasi LCA perkerasan lentur di Jalan Tol Balikpapan – Samarinda yaitu 208,14 ton CO₂ yang didapatkan dengan metode *Table Energy Use and GHG Emissions for Pavement Construction* dan metode konversi bahan bakar. Penelitian tersebut tidak menggunakan *software* dan *database* namun menggunakan perhitungan berdasarkan tabel data penggunaan energi dan emisi gas rumah kaca CO₂ dalam konstruksi

perkerasan jalan, serta mengkonversikan konsumsi bahan bakar yang digunakan menjadi energi dan gas rumah kaca CO₂ mengacu pada IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Penggunaan RAP sebesar 50% dapat menurunkan emisi pemanasan global namun karena cukup tingginya energi yang digunakan pada proses ekstraksi jalan eksisting dan produksi dengan RAP menyebabkan metode alternatif ini belum cukup efektif dalam menurunkan dampak GWP. Proses produksi material menjadi tahap yang menghasilkan emisi CO₂ terbesar dan berdampak tinggi terhadap *global warming*, oleh karena itu upaya untuk meminimasi emisi CO₂ menjadi salah satu kunci utama untuk mereduksi potensi pemanasan global (Zhou et al., 2021).

Berbeda dengan dampak pemanasan global, dampak yang disebabkan oleh aspek kelangkaan sumber daya alam tidak terbarukan akibat kegiatan antropogenik atau *fossil resource scarcity* (Oreto et al., 2021) menunjukkan perbedaan yang paling signifikan dengan adanya pemanfaatan RAP sebagai substitusi agregat alami. Penipisan sumber daya menjadi masalah yang sangat penting karena berpotensi menyebabkan kelangkaan sumber daya untuk generasi yang akan datang (Rimos, Andrew and David 2012). Ekstraksi sumber daya yang dilakukan dengan mudah saat ini dapat menyebabkan penurunan kualitas sumber daya di masa yang akan datang, namun dengan tantangan dan kesulitan proses ekstraksi yang lebih tinggi maka membutuhkan alternatif teknologi yang lebih canggih, dan pada akhirnya kondisi tersebut membutuhkan biaya produksi yang semakin besar (Ponsioen, Vieira, Goedkoop 2014). Upaya daur ulang material dan minimisasi bahan aspal melalui implementasi RAP pada jalan nasional memberikan penurunan dampak *fossil resource scarcity* yang cukup signifikan, dimana substitusi agregat alami dengan RAP sebanyak 50% dari komposisi total agregat atau sekitar 390 ton/km jalan beraspal mampu mereduksi dampak kelangkaan sumber daya fosil sebesar 19,6 ton oil eq. Satuan kg oil eq pada dampak FRS menggambarkan penipisan bahan bakar fosil dan dapat dikonversi ke dalam satuan MJ (Galgani et al. 2021). Massa atau volume sumber daya fosil dapat dikonversi berdasarkan *lower heating value* (LHV), dimana 1 kg crude oil equivalent memiliki LHV sebesar 41,868

MJ (Ponsioen, Vieira, Goedkoop 2014). Dengan demikian, 19,6 ton oil eq emisi FRS yang berhasil direduksi setara dengan penghematan energi sebesar 820,61 MJ.

Berbanding terbalik dengan dampak lingkungan yang dijabarkan sebelumnya, dampak pencemaran partikulat atau *fine particulate matter formation* tampak lebih besar pada perkerasan jalan yang menggunakan RAP. Menurut Ashtiani (2020), emisi PM semakin meningkat pada kadar RAP 20% dan 40% dibandingkan 0% RAP, dikarenakan semakin besar kadar RAP yang digunakan maka semakin tinggi suhu yang dibutuhkan untuk pencampuran aspal saat konstruksi. Hal ini sesuai dengan hasil analisis kontribusi kegiatan (Gambar 7) dimana penggunaan diesel dan listrik yang lebih besar pada proses RAP menjadi penyebab besarnya beban PM tersebut, dikarenakan adanya penambahan proses *milling* dan pengolahan RAP mentah. Pada penelitian (Hasan et al. 2022) yang dilakukan dengan pendekatan periode 30 tahun dan mencakup kegiatan pengaspalan kembali pada lapisan *wearing course* setiap 5 tahun, diketahui total dampak PM dari penampang perkerasan beraspal di Abu Dhabi yang terdiri dari lapis aspal *wearing course* dan *base course* sebesar 8,12 ton PM_{2,5} eq per unit fungsi 3,5 km jalan, atau 2,32 ton PM_{2,5} eq/km jika dinormalisasi ke dalam unit fungsi 1 km jalan. Jika dibandingkan dengan hasil perhitungan PM pada penelitian ini yaitu 0,74 ton PM_{2,5} eq/km untuk aspal konvensional maka dampak yang dihasilkan masih jauh lebih rendah.

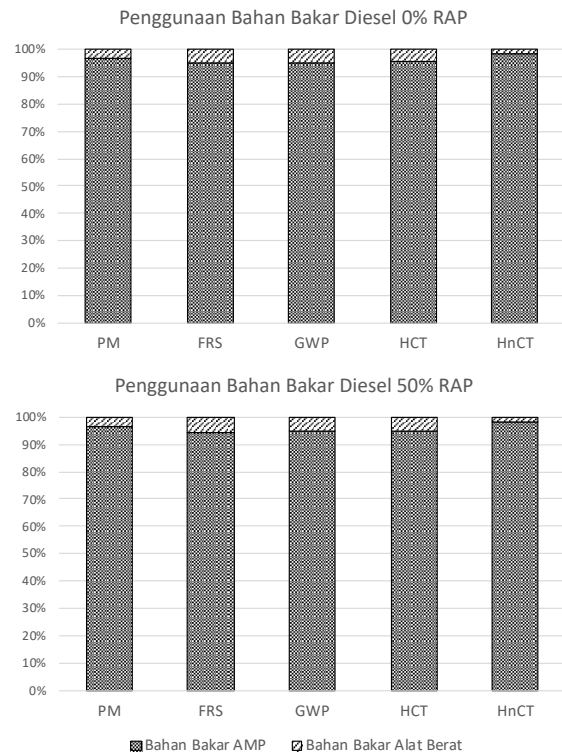
Selain dampak terhadap lingkungan, penelitian ini juga menganalisa dampak terhadap kesehatan manusia. Penggunaan aspal daur ulang memberikan penurunan dampak kesehatan manusia baik yang bersifat karsinogenik maupun non karsinogenik. Dampak *human carcinogenic toxicity* pada penelitian Oreto et al. (2021) terhadap beragam variasi perkerasan aspal pada lapis *binder* dan *base* dengan pendekatan *cradle to grave* berkisar antara 13 hingga 19 ton 1,4-DCB, jauh lebih tinggi dari hasil penelitian ini. Dalam LCIA, analisa dampak pada kategori toksisitas manusia fokus pada dampak yang dihasilkan akibat paparan secara langsung (Krewitt et al. 2002). *International Agency for Research on Cancer* (IARC) yang merupakan bagian dari WHO telah menetapkan bahwa pembuangan

atau *exhaust* mesin diesel tergolong *carcinogenic to humans* (Group 1), berdasarkan pada bukti yang cukup bahwa paparan gas buang mesin diesel tersebut berkorelasi terhadap peningkatan resiko kanker paru-paru (IARC 2012). Diperlukan penggunaan APD yang aman, pelaksanaan pekerjaan yang sesuai prosedur, dan kontrol emisi pabrik secara rutin untuk mencegah paparan emisi terhadap para pekerja.

Analisis Sensitivitas Efisiensi Bahan Bakar

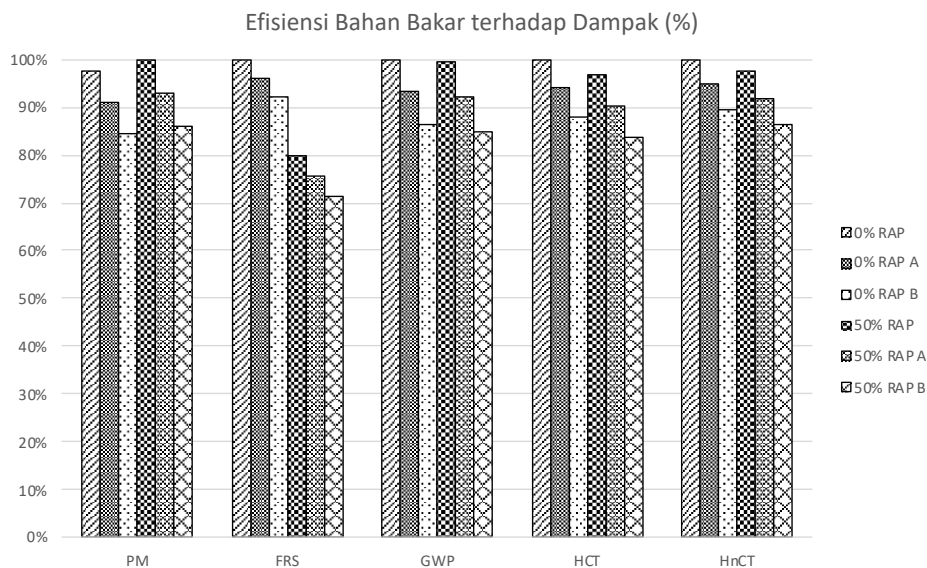
Dari seluruh tahap kegiatan yang termasuk ke dalam batasan daur hidup rehabilitasi jalan beraspal, telah diketahui bahwa kegiatan pembakaran dengan mesin diesel menjadi penyumbang emisi terbesar hampir di seluruh kategori dampak (Gambar 7). Oleh karena itu, penting untuk mengetahui potensi perubahan dampak yang dapat terjadi apabila penggunaan energi bahan bakar dengan solar pada mesin diesel dapat diturunkan melalui analisis sensitivitas.

Pada Gambar 8 terlihat bahwa penggunaan bahan bakar diesel didominasi oleh kegiatan di AMP, baik pada aspal 0% RAP maupun aspal 50% RAP. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar diesel pada saat proses produksi HMA di AMP berpotensi menjadi faktor yang sensitif terhadap perubahan dampak. Pada penelitian Ashtiani (2020), produksi HMA menjadi kontributor terbesar kedua terhadap konsumsi energi setelah tahap rehabilitasi yaitu sebesar 27,53% pada aspal 0% RAP. Oleh karena itu, pada analisis sensitivitas ini diasumsikan penggunaan bahan bakar diesel pada proses produksi HMA dapat diefisiensikan sebesar 10 - 20% dari kondisi awal pada masing-masing aspal 0% RAP dan 50% RAP, sebagai variasi input terhadap model perhitungan LCA.



Gambar 8. Pengaruh Efisiensi Bahan Bakar Diesel terhadap Dampak

Gambar 9 menunjukkan persentase dampak yang dihasilkan dari kadar RAP 0% dan kadar RAP 50% beserta masing-masing penurunan penggunaan bahan bakar diesel, dimana A adalah penurunan bahan bakar diesel AMP sebesar 10% dan B adalah penurunan bahan bakar diesel AMP sebesar 20%. Upaya efisiensi bahan bakar diesel terbukti dapat menurunkan emisi di seluruh kategori dampak, namun terlihat bahwa penurunan bahan bakar pada aspal konvensional sebesar 20% tetap menghasilkan emisi FRS lebih tinggi daripada aspal 50% RAP tanpa adanya efisiensi bahan bakar.



Gambar 9. Pengaruh Efisiensi Bahan Bakar Diesel terhadap Dampak

Untuk setiap 10% efisiensi bahan bakar diesel yang dapat dilakukan, mampu menurunkan dampak PM dengan rentang penurunan sebesar 7-8%, dampak FRS sebesar 4-6%, dampak GWP sebesar 7-9%, dampak HCT sebesar 6-8%, dan dampak HnCT sebesar 5-7%. Penurunan dampak tersebut sesuai dengan penelitian Ashtiani (2020) yang melakukan analisis sensitivitas terhadap efisiensi produksi HMA yang diasumsikan sebesar 20% pada kadar 0% RAP, 20% RAP, dan 40% RAP. Total konsumsi energi menurun secara linear seiring dengan pertambahan kadar RAP tersebut, sedangkan dampak GWP juga semakin menurun namun tidak terlihat perbedaan secara signifikan antara ketiga kadar RAP.

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, upaya reduksi bahan bakar berpotensi cukup besar terhadap penurunan dampak kegiatan perkerasan jalan beraspal, sehingga hal ini dapat menjadi peluang implementasi pembangunan infrastruktur berkelanjutan apabila diterapkan pada pelaksanaan pekerjaan di bidang infrastruktur jalan. Hal yang perlu diperhatikan dalam implementasi efisiensi bahan bakar adalah perlu adanya substitusi sumber energi yang mampu memenuhi kebutuhan produksi HMA sesuai spesifikasi. Upaya untuk mencapai keberlanjutan di bidang perkerasan jalan beraspal membutuhkan strategi pengambilan keputusan yang efektif, dengan mempertimbangkan solusi

keberlanjutan baik aspek teknis dan lingkungan (Oreto et al., 2021).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Melalui metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan *software* OpenLCA dan metode analisa dampak Recipe 2016 Midpoint (H), penggunaan 50% kadar RAP pada perkerasan jalan beraspal terbukti memberikan penurunan dampak *global warming* (GWP) sebesar 1,05 ton CO₂ eq, *fossil resource scarcity* (FRS) sebesar 19,60 ton oil eq, *human carcinogenic toxicity* (HCT) sebesar 0,25 ton 1,4-DCB, dan *human non-carcinogenic toxicity* (HnCT) sebesar 1,79 ton 1,4-DCB dibandingkan tanpa penggunaan RAP. Sedangkan penggunaan 50% kadar RAP tidak terbukti dalam menurunkan dampak *fine particulate matter formation* (PM) dimana dampak PM meningkat 0,02 ton PM_{2,5} eq dibandingkan aspal tanpa RAP. Penggunaan bahan bakar diesel menjadi *hotspot* dari seluruh komponen kegiatan yang berkontribusi terhadap dampak, dan berdasarkan analisis sensitivitas diketahui bahwa efisiensi bahan bakar pada produksi HMA dapat mereduksi seluruh dampak.

Saran

Penelitian LCA bidang jalan di Indonesia dapat dieskalasi dengan meningkatkan data primer berupa pengukuran emisi secara langsung untuk memvalidasi

database yang ada, serta perluasan batasan studi dari tahap ekstraksi sampai tahap operasional dan pemeliharaan untuk mempertajam dan memperkaya analisis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional DKI Jakarta – Jawa Barat, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas izin penggunaan data, serta Lembaga Pengelola Dana Pendidikan, Kementerian Keuangan atas bantuan dana penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Acerro, A. P., Cristina Rodríguez, Andreas Ciroth. 2014. *LCIA methods–Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories*. Berlin: GreenDelta GmbH.
- Ashtiani, M. Z. 2020. Life Cycle Assessment of Hot Mix Asphalt Production with Reclaimed Asphalt Pavement in Washington State. *Preprints* 2020.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2021. *Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat TA. 2020*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat: Jakarta.
- 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.
- Galgani, P., Woltjer, G., Toorop, R. A., and Ruiz, A. G. 2021. *Fossil Fuel and Other Non-Renewable Material Depletion*. Impact-Specific Module for True Price Assessment. True Pricing Method for Agri-Food Products.
- Giunta, M. 2020. Assessment of The Environmental Impact of Road Construction: Modelling and Prediction of Fine Particulate Matter Emissions. *Building and Environment* 176: 106865.
- Hasan, A., Hasan, U., Whyte, A., and Al Jassmi, H. 2022. Lifecycle Analysis of Recycled Asphalt Pavements: Case Study Scenario Analyses of an Urban Highway Section. *CivilEng* 3(2): 242-262.
- Huijbregts, M.A.J., Z.J.N. Steinmann, P.M.F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M.D.M. Vieira, A. Hollander, M. Zijp, R. van Zelm. 2017. *ReCiPe 2016 v1.1. a Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104a*. National Institute for Public Health and the Environment.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). 2012. *IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic*. Press Release 12 June 2012. World Health Organization (WHO).
- Kobayashi, Y., Peters, G. M., Ashbolt, N. J., Shiels, S., and Khan, S. J. 2015. Assessing Burden of Disease as Disability Adjusted Life Years in Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment* 530–531: 120–128.
- Krewitt, W., Pennington, D. W., Olsen, S. I., Crettaz, P., and Jolliet, O. 2002. *Indicators for human toxicity in Life Cycle Impact Assessment*. SETAC Press.
- Ma, F., Dong, W., Fu, Z., Wang, R., Huang, Y., and Liu, J. 2021. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Maintenance: A Case Study in China. *Journal of Cleaner Production* 288 (3), 125595.
- Martinez-Arguelles, G., Acosta, M. P., Dugarte, M., and Fuentes, L. 2019. Life Cycle Assessment of Natural and Recycled Concrete Aggregate Production for Road Pavements Applications in the Northern Region of Colombia: Case Study. *Transportation Research Record* 2673 (5): 1–10.
- Nono. 2018. *Campuran Beraspal Panas Daur Ulang dengan Proporsi RAP Tinggi*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan: Bandung.
- 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. *MDPI-Materials* 14 (14), 3867.
- Ponsioen, T. C., Vieira, M. D. M., and Goedkoop, M. J. 2013. Surplus Cost as A Life Cycle Impact Indicator for Fossil Resource Scarcity. *Int J Life Cycle Assess* 19(4):872-881.
- Rimos, S., Andrew F.A. Hoadley, and David J. Brennan. 2012. Consequence Analysis of Scarcity Using Impacts from Resource Substitution. *Procedia Engineering* 49: 26 – 34.
- Santero, N. J., Masanet, E., and Horvath, A. 2011. Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review. *Resources, Conservation and Recycling* 55(9): 801–809.
- SNI ISO 14040. 2016. *Manajemen Lingkungan – Penilaian Daur Hidup – Prinsip dan Kerangka Kerja*. Badan Standarisasi Nasional.

- Sudarno, Purwanto, dan Pratikso. 2014. Life Cycle Assessment on Cement Treated Recycling Base (CTRB) Construction. *Waste Tech* 1(1): 6-11.
- Vandewalle, D., Antunes, V., Neves, J., and Freire, A. C. 2020. Assessment of Eco-Friendly Pavement Construction and Maintenance Using Multi-Recycled RAP Mixtures. *MDPI -Recycling* 2020 5(3): 17.
- Vidal, R., Moliner, E., Martinez, G., and 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.
- Zhou, X., Zhang, X., Zhang, Y., and Adhikari, S. 2021. Life Cycle Assessment of Asphalt and Cement Pavements: Comparative Cases in Shanxi Province. *Construction and Building Materials*.