

BUKTI KORESPONDENSI
ARTIKEL JURNAL NASIONAL TERAKREDITASI SINTA

Judul Artikel	:	Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment
Jurnal	:	Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, Volume 09, No 2
Penulis	:	Fardzanela Suwanto
Tautan	:	https://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil/article/view/59516

No.	Perihal	Tanggal
1.	Bukti konfirmasi submit artikel dan artikel yang disubmit	4 Oktober 2024
2.	Bukti konfirmasi review dan hasil review pertama	8 Oktober 2024
3.	Bukti konfirmasi submit revisi pertama, respon kepada reviewer, dan artikel yang diresubmit	11 Oktober 2024
4.	Bukti konfirmasi review dan hasil review kedua	18 Oktober 2024
5.	Bukti konfirmasi submit revisi kedua, respon kepada reviewer, dan artikel yang diresubmit	19 Oktober 2024
6.	Bukti konfirmasi artikel accepted	23 Oktober 2024
7.	Bukti konfirmasi artikel published online	31 Oktober 2024

**1. Bukti konfirmasi submit artikel dan artikel
yang disubmit**



fardzanela fardzanela <fardzanela@live.undip.ac.id>

[Jsil] Submission Acknowledgement

[Admin JSIL] <jurnal@apps.ipb.ac.id>

Fri, Oct 4, 2024 at 4:19 PM

To: Fardzanela Suwanto <fardzanela@live.undip.ac.id>

Fardzanela Suwanto:

Thank you for submitting the manuscript, "Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment" to Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil/authorDashboard/submission/59516>

Username: fardzanela

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

[Admin JSIL]

Editor Jurnal Teknik Sipil

dan Lingkungan <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil> email: jsil_ipb@apps.ipb.ac.id

2. Bukti konfirmasi review dan hasil review pertama



[Jsil] Editor Decision

2024-10-08 08:07 PM

Fardzanela Suwanto, Tri Sudibyo:

We have reached a decision regarding your submission to Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, "Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment".

Our decision is to: Revision required
Please check the attached files

Best regards,

Chusnul Arif

Ketua Dewan Editor Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan

Editor Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan

<http://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil> email: jsil_ipb@apps.ipb.ac.id

Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment

Abstrak: Penelitian ini mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal dengan metode Life Cycle Assessment (LCA). Variasi RAP mulai dari 0% hingga 50% dianalisis terhadap 18 kategori dampak, termasuk Global Warming, Water Consumption, dan Resource Scarcity. Hasil menunjukkan bahwa RAP mengurangi Mineral Resource Scarcity hingga 37,1%, Land Use 35,2%, dan Water Consumption sebesar 26,2%, dengan kontribusi terbesar berasal dari pengurangan penggunaan material baru. Namun, RAP meningkatkan dampak pada Terrestrial Ecotoxicity akibat konsumsi energi yang lebih tinggi pada fase pencampuran. Penelitian ini mendukung penggunaan RAP untuk meningkatkan keberlanjutan infrastruktur jalan dengan optimasi proses pencampuran untuk meminimalkan dampak negatif.

Kata kunci: RAP, Life Cycle Assessment, dampak lingkungan, kontribusi relatif.

1. Pendahuluan

Pembangunan jalan raya telah menggunakan sumber daya alam dalam jumlah yang besar, yang kini menimbulkan perhatian terhadap keberlanjutan dalam sektor infrastruktur jalan. Selama beberapa tahun terakhir, emisi yang dihasilkan dari konstruksi jalan meningkat secara signifikan, terutama di negara-negara berkembang yang tengah mempercepat pembangunan infrastruktur untuk mendukung pertumbuhan ekonomi (1). Salah satu tantangan utama dalam rekayasa perkerasan adalah memenuhi permintaan sumber daya lingkungan yang terus meningkat, baik dalam proses konstruksi maupun pemeliharaan, dengan tetap memastikan keberlanjutan proyek tersebut (2). Lebih lanjut, dalam konteks pemeliharaan jalan, sejumlah besar material limbah dari campuran beraspal telah dihasilkan, namun pemanfaatannya dalam desain perkerasan jalan masih terbatas (3), dengan (4) melaporkan bahwa jutaan ton aspal terbuang sia-sia akibat penggantian perkerasan jalan yang rusak. Namun, material limbah ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pengganti agregat pada konstruksi perkerasan jalan baru. Material hasil milling dari proses pemeliharaan dan rehabilitasi lapisan aspal, yang dikenal sebagai RAP, dapat didaur ulang dan diintegrasikan ke dalam campuran aspal baru. (5) menawarkan solusi potensial untuk meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi jalan dan mengatasi tantangan-tantangan lingkungan yang dihadapi oleh sektor ini.

Lebih jauh lagi, mengenai performa aspal dengan campuran RAP, penelitian terkini juga menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran perkerasan aspal dapat memberikan performa yang sebanding dengan Hot Mix Asphalt (HMA) konvensional, sebagaimana dilaporkan dalam beberapa

Diterima: hh mm yyyy
Diperbaiki: hh mm yyyy
Disetujui: hh mm yyyy

Commented [HP1]: Abstract terlalu singkat: Tambahkan brief permasalahan, dan metode penelitian pada bagian ini.

Commented [HP2]: sebutkan sumberdaya alamnya, tambahkan nilai kuantitatif yang mendukung pernyataan ini.

Commented [HP3]: berapa peningkatannya?

Commented [HP4]: material apa?sebutkan dan tambahkan data pendukung berapa banyaknya

Commented [HP5]: untuk muncul pertama pada tiap bab sebaiknya tuliskan lengkapnya

studi (6–8). Beberapa riset bahkan meneliti efek kandungan RAP pada perkerasan jalan sampai dengan prosentase 50% (9,10). Namun, meskipun potensi RAP dari segi teknis sangat menjanjikan, penggunaannya dalam produksi aspal daur ulang memerlukan penyesuaian teknis, terutama dalam hal suhu pencampuran yang lebih tinggi dibandingkan dengan HMA biasa. Laporan NCHRP menyarankan agar suhu pemanasan awal material RAP tidak melebihi 110°C, namun suhu pencampuran harus mencapai 165–175°C agar campuran daur ulang dapat dipadatkan dengan baik (11). Peningkatan suhu ini membawa konsekuensi pada peningkatan konsumsi energi, yang pada akhirnya mempengaruhi jejak lingkungan (environmental footprint) dari proses produksi campuran aspal.

Keberlanjutan campuran aspal yang digunakan sebagai bahan perkerasan jalan dalam infrastruktur transportasi harus mempertimbangkan efisiensi dalam hal dampak lingkungan. Oleh karena itu, pengenalan penggunaan material tambahan ke dalam campuran aspal harus selalu disertai dengan penilaian siklus hidup dengan LCA. Dampak dan jejak lingkungan dari penggunaan suatu produk atau proyek pembangunan dapat dianalisa dengan metode ini. Selain itu, literatur ilmiah di bidang LCA perkerasan jalan terus berkembang. Banyak penelitian menunjukkan bahwa LCA adalah metodologi yang sangat berguna untuk mendukung pemilihan teknik perkerasan yang optimal, mencakup seluruh fase pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, renovasi, hingga pengelolaan limbah (12). (2,13) menyebutkan bahwa penerapan LCA pada perkerasan jalan semakin meningkat, yang mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap penggunaan pendekatan siklus hidup dalam menilai beban lingkungan dari setiap tahap siklus hidup perkerasan, dari fase konstruksi hingga akhir masa pakai.

Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengintegrasikan analisis LCA guna mengevaluasi penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dari penggunaan energi yang lebih tinggi dalam proses pencampurannya. LCA akan digunakan untuk menilai sejauh mana penggunaan RAP mempengaruhi keberlanjutan proyek perkerasan jalan di Indonesia, dengan fokus pada kategori dampak lingkungan seperti emisi karbon, toksisitas, serta penggunaan sumber daya.

2. Metode

Kerangka metodologi LCA ini didasarkan pada standar ISO 14040 (14), yang merekomendasikan langkah-langkah berikut: definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi hasil. Sebagai langkah awal, informasi mengenai material dan desain struktur perkerasan digunakan sebagai data masukan untuk LCA.

2.1. Definisi Ruang Lingkup

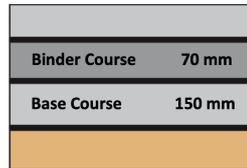
Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan campuran aspal dengan RAP. Berbagai persentase RAP dalam campuran dibandingkan dengan struktur perkerasan yang disusun dengan HMA konvensional (tanpa RAP), untuk melihat bagaimana RAP berdampak pada lingkungan. Dalam studi ini, RAP tidak digunakan pada lapisan permukaan jalan karena penggunaannya pada permukaan tidak direkomendasikan. Sebaliknya, RAP diaplikasikan pada lapisan binder dan base course, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Persentase RAP yang digunakan bervariasi antara 0% (referensi), 10% (Scenario 1), 20% (Scenario 2), 30% (Scenario 3), 40% (Scenario 4), dan 50% (Scenario 5). Diasumsikan bahwa densitas massa campuran dengan dan tanpa RAP tetap sama seperti yang direkomendasikan pada penelitian sebelumnya [Mukherjee 2016; Kaseer, Arámbula-Mercado, & Martin 2019].

Commented [HP6]: tambahkan hasil penelitian sebelumnya untuk mendukung pernyataan ini

Commented [HP7]: sumber?

Commented [HP8]: Penelitian LCA pada aspal di penelitian sebelumnya apakah belum ada? tambahkan, sehingga bisa dijadikan rujukan untuk mendukung kebaruan dari penelitian ini

Commented [HP9]: format



Gambar 1. Studi kasus penampang perkerasan jalan

Lokasi pembangunan jalan yang dianalisis adalah jalan arteri Jl. Perintis Kemerdekaan, Semarang, dengan campuran aspal yang terdiri dari aspal penetrasi 60/70 dan agregat alam. Functional Unit yang digunakan untuk mengkuantifikasi dampak lingkungan adalah 1 km panjang jalan dengan lebar jalan 3,5 meter, menggunakan campuran HMA sesuai standar nasional Indonesia. LCA dalam penelitian ini difokuskan pada fase produksi raw material (bahan mentah), transportasi raw material, mixing asphalt (pencampuran), transportasi ke site, dan konstruksi, dengan pendekatan cradle-to-lyng.

2.2. Inventaris Siklus Hidup

Material Bagian ini menjelaskan sumber data input/output dari proses LCA. Basis data yang digunakan adalah Ecoinvent versi 3.8 (Ecoinvent, 2021), diproses menggunakan perangkat lunak SimaPro 9.3.3.

Pada fase raw material, aspal cair dimodelkan menggunakan dataset Ecoinvent "Bitumen adhesive compound hot (RoW)| production | Cut-off U", sementara agregat alam dimodelkan menggunakan dataset "Gravel crushed (RoW)| production | Cut-off U". Pemodelan ini dilakukan untuk memastikan akurasi dalam perhitungan dampak lingkungan yang terkait dengan material dasar yang digunakan dalam campuran aspal.

Pada fase transportasi Bahan Baku ke Asphalt Mixing Plant (AMP): Jarak transportasi bahan mentah ke AMP diperoleh melalui wawancara dengan manajer proyek di lokasi studi kasus. Semua fase transportasi bahan baku dimodelkan menggunakan dataset dari Ecoinvent v3, yaitu "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return". Unit yang digunakan adalah ton-kilometer (tkm), yang dihitung dengan mengalikan berat material dengan jarak transportasi ke AMP. Tabel 1 menyajikan ringkasan jarak dan ukuran angkutan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Jarak dan besaran ukuran angkutan barang pada fase transportasi raw material

Binder Course							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Aspal	35	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74
Agregat	10	5568.36	4980.36	4392.36	3804.36	3216.36	2628.36
RAP	15	0	882	1764	2646	3528	4410

Base Course							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Aspal	35	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74
Agregat	10	5568.36	4980.36	4392.36	3804.36	3216.36	2628.36
RAP	15	0	882	1764	2646	3528	4410

Aspal	35	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25
Aggregat	10	12337.5	11103.75	9870	8636.25	7402.5	6168.75
RAP	15	0	1850.625	3701.25	5551.875	7402.5	9253.125

Pada fase pembuatan campuran aspal, proses pencampuran aspal dilakukan menggunakan pabrik pencampuran batch dengan kapasitas 160 ton/jam, yang membutuhkan daya termal sebesar 12.000 kWh (Santos, Candido, Baulé, Oliveira, & Thives, 2020). Setiap ton campuran aspal mengonsumsi energi sebesar 75 kWh. Untuk campuran HMA yang mengandung RAP, suhu pencampuran lebih tinggi diperlukan untuk memastikan campuran dapat dipadatkan dengan baik, karena aspal pada RAP cenderung lebih kaku dibandingkan aspal baru. Penambahan RAP menyebabkan peningkatan konsumsi energi sebesar 5% untuk campuran dengan 20-40% RAP, dan 10% untuk campuran dengan 50% RAP. Untuk pemodelan energi ini, digunakan dataset "District heat, light fuel oil, at industrial furnace" dari Ecoinvent. Pada fase transportasi ke lokasi konstruksi, jarak transportasi dari AMP ke lokasi konstruksi diasumsikan sama untuk semua campuran aspal, yaitu 16 km. Transportasi ini dimodelkan dengan dataset "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return" untuk memodelkan emisi transportasi. Pada tahap konstruksi, berbagai jenis alat berat digunakan untuk operasi pengaspalan, pemadatan, dan penggilingan. Produktivitas dan daya mesin untuk setiap jenis alat berat ditampilkan di **Tabel 2**. Emisi yang dihasilkan dihitung berdasarkan tingkat utilitas alat berat, yang dikalikan dengan daya mesin untuk menghitung konsumsi energi. Emisi gas rumah kaca (GWP) dihitung menggunakan dataset global "Diesel burned in building machine {GLO}" dari Ecoinvent.

Tabel 2. Data alat pada fase konstruksi

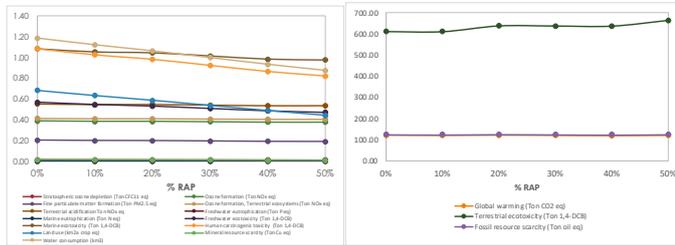
Mesin	Model	Produktivitas	Tenaga mesin (kW)
Asphalt Paver	BOMAG BF 600 P-3	1,530 m ² /jam	129
Tandem Roller	DYNAPAC CC2200	800 m ² /jam	75
Pneumatic Roller	DYNAPAC CP275	2,300 m ² /jam	93

2.3. Kategori dampak yang dievaluasi

Pemodelan karakterisasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dilakukan dengan menerapkan metode penilaian dampak ReCiPe Midpoint, menurut perspektif hierarki (15). Secara khusus, kategori dampak berikut dipertimbangkan: Global warming, Stratospheric ozone depletion, Ionizing radiation, Ozone formation, Fine particulate matter formation, Ozone formation, Terrestrial ecosystems, Terrestrial acidification, Freshwater eutrophication, Marine eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity, Human non-carcinogenic toxicity, Land use, Mineral resource scarcity, Fossil resource scarcity, Water consumption. Dalam analisis ini, perangkat lunak Simapro 9.0 yang dikembangkan oleh Pre Sustainability, Belanda, digunakan untuk memodelkan sistem atau proses guna mengevaluasi efek penambahan RAP pada dampak environmental (16) Simapro adalah perangkat lunak komersial yang digunakan untuk pemodelan, penghitungan, dan visualisasi material serta sistem aliran energi. Alat ini digunakan untuk menganalisis aliran proses di seluruh siklus hidup suatu produk.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Penelitian ini mengkaji dampak lingkungan dari penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan berbagai persentase (0% hingga 50%). Melalui analisis menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), diperoleh data yang mencakup 18 kategori dampak lingkungan yang diukur berdasarkan metode Recipe Midpoint H. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan RAP memberikan pengaruh positif terhadap penurunan dampak lingkungan pada sebagian besar kategori (**Gambar 2**).



Gambar 2. Dampak lingkungan pada tiap kenaikan presentase RAP

Sebagaimana juga ditunjukkan pada **Tabel 3**, kategori dampak seperti Mineral resource scarcity, Land use, Water consumption, Human carcinogenic toxicity, Freshwater eutrophication, Freshwater ecotoxicity, dan Marine eutrophication mengalami penurunan yang signifikan pada skenario penggunaan 50% RAP. Penurunan terbesar terjadi pada kategori Mineral resource scarcity, dengan penurunan sebesar 37,1%. Penurunan dampak lingkungan pada kategori lain juga signifikan, yakni sebesar 35,2% untuk Land use, 26,2% untuk Water consumption, serta penurunan lebih lanjut pada Human carcinogenic toxicity (24,4%), Freshwater eutrophication (23,4%), dan Freshwater ecotoxicity (17,1%). Kategori lain seperti Ionizing radiation, Human non-carcinogenic toxicity, Marine ecotoxicity, dan Fine particulate matter formation menunjukkan penurunan yang lebih moderat. Pada skenario 50% RAP, masing-masing kategori ini mengalami penurunan sebesar 11,8%, 11,5%, 10,1%, dan 6,1%. Meskipun penurunan ini tidak sebesar kategori sebelumnya, hasil tersebut tetap menunjukkan adanya kontribusi positif terhadap pengurangan dampak lingkungan dari penggunaan RAP. Sebaliknya, kategori Global warming dan Fossil resource scarcity menunjukkan pola yang lebih fluktuatif dan tidak konsisten seiring dengan peningkatan persentase RAP. Di sisi lain, kategori Terrestrial ecotoxicity justru mengalami peningkatan dampak seiring dengan bertambahnya RAP, yang memerlukan analisis lebih lanjut mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi hasil tersebut.

Commented [HP10]: Sb y?
Sb X: double %.
Legenda tidak kelihatan

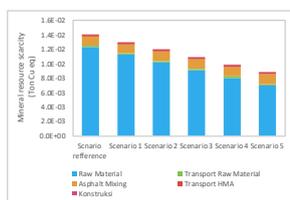
Tabel 3. Nilai dampak lingkungan pada skenario penelitian

Impact category	Unit	Scenario Reference	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Global warming (Ton CO2 eq)	Ton CO2 eq	121.09	119.75	121.16	119.82	118.48	119.88
Stratospheric ozone depletion (Ton CFC11 eq)	Ton CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ionizing radiation (103 Co-60 eq)	1000 kBq Co-60 eq	5.59	5.43	5.34	5.18	5.02	4.93
Ozone formation (Ton NOx eq)	Ton NOx eq	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Fine particulate matter formation (Ton PM2.5 eq)	Ton PM2.5 eq	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19

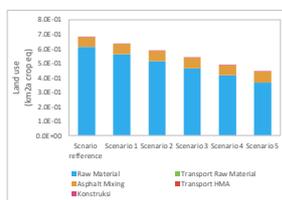
Ozone formation, Terrestrial ecosystems (Ton NOx eq)	Ton NOx eq	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40
Terrestrial acidification Ton NOx eq	Ton SO2 eq	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54
Freshwater eutrophication (Ton P eq)	Ton P eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Marine eutrophication (Ton N eq)	Ton N eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Terrestrial ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	611.55	611.08	637.60	637.13	636.66	663.17
Freshwater ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47
Marine ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.05	1.05	1.01	0.98	0.98
Human carcinogenic toxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.03	0.98	0.92	0.86	0.82
Human non-carcinogenic toxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	20.77	20.15	19.89	19.26	18.64	18.38
Land use (km2a crop eq)	km2a crop eq	0.68	0.63	0.59	0.54	0.49	0.44
Mineral resource scarcity (Ton Cu eq)	Ton Cu eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fossil resource scarcity (Ton oil eq)	Ton oil eq	124.76	124.43	124.98	124.64	124.30	124.85
Water consumption (km3)	km3	1.19	1.12	1.06	1.00	0.93	0.88

Dari 18 kategori dampak yang dianalisis, penurunan dampak lingkungan yang signifikan pada enam kategori utama (Mineral resource scarcity, Land use, Water consumption, Human carcinogenic toxicity, Freshwater eutrophication, dan Freshwater ecotoxicity) terutama disebabkan oleh pengurangan penggunaan bahan baku baru melalui substitusi RAP. Pengurangan penggunaan agregat alam dengan RAP secara signifikan mengurangi dampak lingkungan pada kategori Mineral resource scarcity, Land use, dan Water consumption (**Gambar 3.a-c**).

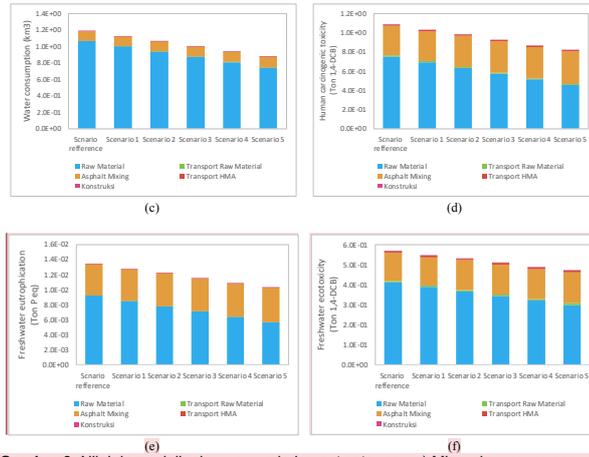
Namun demikian, fase pencampuran aspal (asphalt mixing) dengan RAP menunjukkan adanya sedikit peningkatan dampak pada beberapa kategori. Sebagai contoh, pada kategori Freshwater ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity, dan Marine ecotoxicity (**Gambar 3.d-f**), fase pencampuran memiliki kontribusi yang lebih besar dibandingkan fase lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun substitusi agregat alam dengan RAP menurunkan dampak lingkungan secara keseluruhan, peningkatan konsumsi energi dan emisi dari proses asphalt mixing tetap harus diperhitungkan.



(a)



(b)



Gambar 3. Nilai dampak lingkungan pada impact category: a) Mineral resource scarcity, b) Land use, c) Water consumption, d) Human carcinogenic toxicity, e) Freshwater eutrophication, dan f) Freshwater ecotoxicity

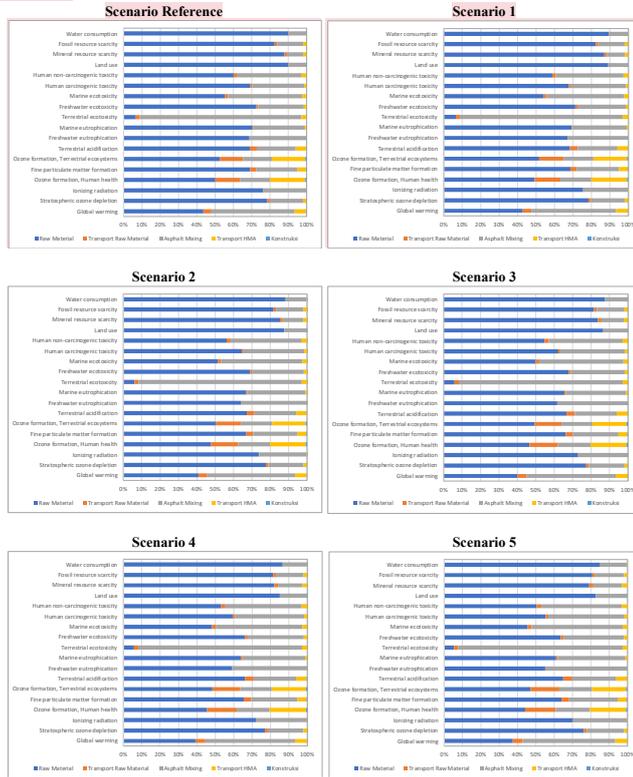
Penelitian ini juga mengidentifikasi kontribusi masing-masing fase dalam siklus hidup perkerasan terhadap dampak lingkungan untuk setiap skenario. Pada skenario referensi, yaitu campuran beraspal tanpa kandungan RAP, fase produksi raw material mendominasi kontribusi terhadap dampak lingkungan pada hampir semua impact category, dengan kontribusi berkisar antara 50-90%. Secara spesifik, kontribusi terbesar dari raw material muncul pada kategori global warming (44%), ionizing radiation (76%), dan land use (90%), karena semua bahan yang digunakan adalah bahan baru. Namun, pada kategori Global Warming dan Terrestrial Ecotoxicity, fase asphalt mixing menjadi penyumbang dampak terbesar, masing-masing sebesar 45% dan 88%, serta menyumbang 23% pada kategori fine particulate matter formation. Fase transportasi HMA memiliki kontribusi kecil, sekitar 6%, untuk beberapa kategori.

Pada skenario 1 dan 2, dengan penambahan 10% dan 20% RAP, fase produksi raw material masih mendominasi kontribusi pada sebagian besar impact category, meskipun kontribusi ini menurun menjadi 49-89%, terutama pada kategori global warming yang turun menjadi 43%, dan land use yang turun menjadi 89%. Penurunan ini disebabkan oleh pengurangan penggunaan agregat alami yang sebagian digantikan oleh RAP. Pencampuran aspal tetap menyumbang kontribusi besar (45%), sedangkan fase transportasi tetap stabil tanpa perubahan signifikan. Pada skenario 2 dan 3, dengan penambahan RAP sebesar 20-30%, kontribusi fase raw material terus menurun, dengan global warming turun menjadi 41-40% dan land use menjadi 88-87%. Namun, fase asphalt mixing tetap dominan dengan kontribusi 48% terhadap global warming, dan sedikit peningkatan kontribusi terjadi pada fase transportasi karena lebih banyak RAP yang diangkut. Peningkatan kebutuhan suhu pencampuran aspal sebesar 5% juga menyebabkan peningkatan konsumsi energi pada fase ini. Pada skenario 4, dengan 40% RAP, kontribusi fase raw material dan asphalt mixing mulai berimbang pada sebagian besar impact category. Raw material menyumbang 39% pada global warming dan 85% pada land use, sedangkan asphalt mixing meningkat kontribusinya menjadi 49%. Peningkatan suhu pencampuran sebesar 10% turut mempengaruhi peningkatan dampak dari fase ini. Transportasi tetap memberikan kontribusi stabil di sekitar 6-7%. Pada skenario 5, dengan 50% RAP, fase asphalt mixing menjadi penyumbang terbesar pada sebagian besar impact category. Kontribusinya mencapai 50% untuk global warming dan

Commented [HP11]: apakah scenario dapat diganti dengan parameter kuantitatif?

Commented [HP12]: format penulisan belum mengikuti template

freshwater eutrophication, serta 50% untuk marine ecotoxicity, sementara fase terrestrial ecotoxicity mendominasi hingga 90%. Penggunaan raw material terus menurun, dengan kontribusi terhadap global warming turun menjadi 37% dan land use menjadi 83%, sedangkan fase transportasi tetap stabil di sekitar 6-7%.



Gambar 4. Kontribusi relatif fase siklus hidup pada tiap skenario penambahan RAP

Keseluruhan hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP pada campuran aspal memberikan dampak positif terhadap lingkungan, terutama dalam hal penghematan sumber daya alam (raw material). Namun, pada saat yang sama, proses mixing aspal untuk campuran yang mengandung RAP akan meningkatkan dampak lingkungan yang disebabkan oleh kenaikan suhu pencampuran. Sehingga

peningkatan dampak pada fase pencampuran menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut dalam proses produksi campuran aspal dengan RAP.

4. Kesimpulan

Kesimpulan Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran aspal dapat secara signifikan mengurangi dampak lingkungan, terutama dalam kategori yang terkait dengan penggunaan sumber daya alam. Penggunaan RAP hingga 50% dalam campuran aspal mengurangi Mineral Resource Scarcity sebesar 37,1%, Land Use sebesar 35,2%, dan Water Consumption sebesar 26,2%. Kontribusi relatif terbesar terhadap pengurangan dampak berasal dari penurunan penggunaan bahan baku baru, yang sangat berpengaruh pada kategori Mineral Resource Scarcity dan Land Use. Namun, peningkatan RAP juga menyebabkan peningkatan pada Terrestrial Ecotoxicity, yang berhubungan dengan fase asphalt mixing. Fase ini memerlukan lebih banyak energi karena suhu pencampuran yang lebih tinggi, yang berkontribusi terhadap peningkatan dampak toksisitas. Oleh karena itu, optimasi pada proses pencampuran perlu dilakukan untuk mengurangi dampak negatif tersebut. Meskipun demikian, hasil penelitian ini mendukung penggunaan RAP sebagai solusi berkelanjutan untuk pembangunan infrastruktur jalan, dengan pengurangan dampak lingkungan yang signifikan, terutama pada fase material.

Penelitian ini berkontribusi pada pemahaman tentang dampak penggunaan RAP dan memberikan dasar untuk pengembangan kebijakan yang mendukung penerapan material daur ulang dalam infrastruktur jalan di Indonesia.

Daftar Pustaka

1. World Bank. Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation, A Toolkit for Developing Countries; ROADCO Toolkit User Manual User Manual. A World Bank Rep. 2011;
2. Santero NJ, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2011;55(9–10):810–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>
3. Zhao Z, Xiao F, Amirkhania S. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste Manag* [Internet]. 2020;108:78–105. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>
4. Dong Q, Huang B. Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material. *J Mater Civ Eng*. 2014;26(2):379–83.
5. Audrey Copeland. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Rep No FHWA-HRT-11-021. 2011;(FHWA);McLean, Virginia.
6. Zaumanis M, Mallick RB. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *Int J Pavement Eng* [Internet]. 2015;16(1):39–55. Available from: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
7. Lo Presti D, Jiménez Del Barco Carrión A, Airey G, Hajj E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. *J Clean Prod* [Internet]. 2016;131:43–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093>
8. Porot L, Di Nolfo M, Polastro E, Tulcinsky S. Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent. In: Porot, Laurent, et al "Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent" Proceedings of the 6th Eurasphalt Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic; 2017. p. 1–8.
9. D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, Baumgardner G, Corrigan M, Cowser J, et al. Warm-Mix asphalt : European Practice. *Fed Highw Adm*. 2008;68.
10. Vaitkus A, Vorobjovas V, Žalimienė L, Žiliūtė L. The research on the use of warm mix asphalt for asphalt Pavement structures Road traffic noise mitigation under development of noiseless pavements View project Modular pavements View project THE RESEARCH ON THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR ASPHALT PAVEMENT. In: Proceedings of the XXVII International Baltic Road Conference [Internet]. Riga, Latvia; 2009. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/237582194>
11. McDaniel RS, Soleymani H, Anderson RM, Turner P, Peterson R. Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method. NCHRP Proj D9-12 Contract Final Rep.

3. Bukti konfirmasi submit revisi pertama, respon kepada reviewer, dan artikel yang diresubmit

Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment

Abstrak: Pembangunan infrastruktur jalan raya memerlukan sumber daya alam yang signifikan dan menghasilkan dampak lingkungan yang tinggi, seperti emisi karbon dan penggunaan air. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah diidentifikasi sebagai salah satu solusi berkelanjutan untuk mengurangi konsumsi material baru. Penelitian ini menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan RAP dengan variasi persentase 0% hingga 50%, dan dianalisis terhadap 18 kategori dampak. Data dikumpulkan menggunakan perangkat lunak SimaPro dengan basis data Ecoinvent. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RAP mampu mengurangi Mineral Resource Scarcity sebesar 37,1%, Land Use sebesar 35,2%, dan Water Consumption sebesar 26,2%, dengan kontribusi terbesar berasal dari pengurangan penggunaan material baru. Sebaliknya, peningkatan RAP menyebabkan kenaikan pada kategori Terrestrial Ecotoxicity akibat konsumsi energi lebih tinggi pada fase pencampuran. Penelitian ini menunjukkan bahwa RAP dapat secara signifikan meningkatkan keberlanjutan perkerasan jalan, namun optimasi proses pencampuran tetap diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif.

Kata kunci: RAP, Life Cycle Assessment, dampak lingkungan, kontribusi relatif.

1. Pendahuluan

Pembangunan jalan raya telah menggunakan sumber daya alam dalam jumlah yang besar, yang kini menimbulkan perhatian terhadap keberlanjutan dalam sektor infrastruktur jalan. Selama beberapa tahun terakhir, emisi yang dihasilkan dari konstruksi jalan meningkat secara signifikan, terutama di negara-negara berkembang yang tengah mempercepat pembangunan infrastruktur untuk mendukung pertumbuhan ekonomi (1). Jumlah pembangunan pada infrastruktur jalan ini hampir mencakup 21 juta kilometer di seluruh dunia (2). Selain itu, pemeliharaan dan konstruksi perkerasan jalan bertanggung jawab atas sekitar 30% konsumsi energi dan emisi karbon (3). Sehingga salah satu tantangan utama dalam rekayasa perkerasan adalah memenuhi permintaan sumber daya lingkungan yang terus meningkat, baik dalam proses konstruksi maupun pemeliharaan, dengan tetap memastikan keberlanjutan proyek tersebut (4).

Lebih lanjut, dalam konteks pemeliharaan jalan, sejumlah besar material limbah dari campuran beraspal telah dihasilkan, namun pemanfaatannya dalam desain perkerasan jalan masih terbatas (5), dengan (6) melaporkan bahwa jutaan ton aspal terbuang sia-sia akibat penggantian perkerasan jalan yang rusak. Salah material campuran beraspal dengan proporsi besar yang digunakan yaitu agregat alamyang merupakan komponen utama dari campuran perkerasan jalan. Pada akhir masa pakainya, bahan limbah potensial

Diterima: hh mm yyyy
Diperbaiki: hh mm yyyy
Disetujui: hh mm yyyy

Commented [HP1]: Abstract terlalu singkat. Tambahkan brief permasalahan, dan metode penelitian pada bagian ini.

Commented [HP2]: sebutkan sumberdaya alamnya, tambahkan nilai kuantitatif yang mendukung pernyataan ini.

Commented [HP3]: berapa peningkatannya?

Commented [HP4]: material apa?sebutkan dan tambahkan data pendukung berapa banyaknya

berakhir di tempat pembuangan sampah dan berkontribusi pada limbah konstruksi, yang menyumbang lebih dari 30% dari produksi limbah global (7).

Namun, material limbah ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pengganti agregat pada konstruksi perkerasan jalan baru. Material hasil milling dari proses pemeliharaan dan rehabilitasi lapisan aspal, yang dikenal sebagai Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), dapat daur ulang dan diintegrasikan ke dalam campuran aspal baru. (8) menawarkan solusi potensial untuk meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi jalan dan mengatasi tantangan-tantangan lingkungan yang dihadapi oleh sektor ini.

Lebih jauh lagi, mengenai performa aspal dengan campuran RAP, penelitian terkini juga menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran perkerasan aspal dapat memberikan performa yang sebanding dengan Hot Mix Asphalt (HMA) konvensional, sebagaimana dilaporkan dalam beberapa studi (9–11). Beberapa riset bahkan meneliti efek kandungan RAP pada perkerasan jalan sampai dengan prosentase 50% (12,13). Namun, meskipun potensi RAP dari segi teknis sangat menjanjikan, penggunaannya dalam produksi aspal daur ulang memerlukan penyesuaian teknis, terutama dalam hal suhu pencampuran yang lebih tinggi dibandingkan dengan HMA biasa (14). NCHRP menyarankan agar suhu pemanasan awal material RAP tidak melebihi 110°C, namun suhu pencampuran harus mencapai 165–175°C agar campuran daur ulang dapat dipadatkan dengan baik (14). Peningkatan suhu ini membawa konsekuensi pada peningkatan konsumsi energi, yang pada akhirnya mempengaruhi jejak lingkungan (environmental footprint) dari proses produksi campuran aspal.

Keberlanjutan campuran aspal yang digunakan sebagai bahan perkerasan jalan dalam infrastruktur transportasi harus mempertimbangkan efisiensi dalam hal dampak lingkungan. Oleh karena itu, pengenalan penggunaan material tambahan ke dalam campuran aspal harus selalu disertai dengan penilaian siklus hidup dengan LCA. Dampak dan jejak lingkungan dari penggunaan suatu produk atau proyek pembangunan dapat dianalisa dengan metode ini. Selain itu, literatur ilmiah di bidang LCA perkerasan jalan terus berkembang. Banyak penelitian menunjukkan bahwa LCA adalah metodologi yang sangat berguna untuk mendukung pemilihan teknik perkerasan yang optimal, mencakup seluruh fase pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, renovasi, hingga pengelolaan limbah (15). (4,16) menyebutkan bahwa penerapan LCA pada perkerasan jalan semakin meningkat, yang mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap penggunaan pendekatan siklus hidup dalam menilai beban lingkungan dari setiap tahap siklus hidup perkerasan, dari fase konstruksi hingga akhir masa pakai.

Penelitian mengenai LCA pada aspal telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai aspek konstruksi jalan. Studi yang paling menonjol dilakukan oleh (4,16) yang merangkum penerapan LCA dalam perkerasan jalan dan memberikan gambaran umum mengenai dampak lingkungan pada fase-fase siklus hidup seperti konstruksi, operasi, dan daur ulang. (15) (17) dan juga menunjukkan bahwa LCA adalah metodologi yang sangat berguna dalam mendukung pemilihan teknik perkerasan yang lebih ramah lingkungan. Namun, kebanyakan studi sebelumnya fokus pada penggunaan aspal konvensional atau pada analisis sebagian dari fase siklus hidup (misalnya hanya fase konstruksi atau penggunaan). Penelitian terkait Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) secara khusus, terutama di konteks penggunaan persentase RAP yang tinggi (hingga 50%) di Indonesia, masih terbatas. Selain itu, penelitian sebelumnya seringkali lebih menekankan pada evaluasi teknis (kinerja mekanis) daripada dampak lingkungan secara komprehensif dari RAP.

Commented [HP5]: untuk muncul pertama pada tiap bab sebaiknya tuliskan lengkapnya

Commented [HP6]: tambahkan hasil penelitian sebelumnya untuk mendukung pernyataan ini

Commented [HP7]: sumber

Commented [HP8]: Penelitian LCA pada aspal di penelitian sebelumnya apakah belum ada? tambahkan, sehingga bisa dijadikan rujukan untuk mendukung kebaruan dari penelitian ini

Studi ini berbeda karena menggunakan pendekatan LCA komprehensif yang tidak hanya mengevaluasi fase-fase konstruksi dan penggunaan, tetapi juga mempertimbangkan dampak dari penggunaan RAP dalam campuran aspal pada berbagai kategori lingkungan, termasuk Global Warming, Water Consumption, dan Resource Scarcity. Penelitian ini juga berfokus pada konteks Indonesia, yang belum banyak dieksplorasi dalam studi sebelumnya, memberikan perspektif baru tentang dampak penggunaan RAP di negara berkembang dengan karakteristik material dan proses konstruksi yang berbeda dari negara maju.

Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengintegrasikan analisis LCA guna mengevaluasi penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dari penggunaan energi yang lebih tinggi dalam proses pencampurannya. LCA akan digunakan untuk menilai sejauh mana penggunaan RAP mempengaruhi keberlanjutan proyek perkerasan jalan di Indonesia, dengan fokus pada kategori dampak lingkungan seperti emisi karbon, toksisitas, serta penggunaan sumber daya.

2. Metode

Kerangka metodologi LCA ini didasarkan pada standar ISO 14040 (18), yang merekomendasikan langkah-langkah berikut: definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi hasil. Sebagai langkah awal, informasi mengenai material dan desain struktur perkerasan digunakan sebagai data masukan untuk LCA.

2.1. Definisi Ruang Lingkup

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan campuran aspal dengan RAP. Berbagai persentase RAP dalam campuran dibandingkan dengan struktur perkerasan yang disusun dengan HMA konvensional (tanpa RAP), untuk melihat bagaimana RAP berdampak pada lingkungan. Dalam studi ini, RAP tidak digunakan pada lapisan permukaan jalan karena penggunaannya pada permukaan tidak direkomendasikan. Sebaliknya, RAP diaplikasikan pada lapisan binder dan base course, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Persentase RAP yang digunakan bervariasi antara 0% (referensi), 10% (Scenario 1), 20% (Scenario 2), 30% (Scenario 3), 40% (Scenario 4), dan 50% (Scenario 5). Diasumsikan bahwa densitas massa campuran dengan dan tanpa RAP tetap sama seperti yang direkomendasikan pada penelitian sebelumnya (19,20).

Binder Course	70 mm
Base Course	150 mm

Gambar 1. Studi kasus penampang perkerasan jalan

Lokasi pembangunan jalan yang dianalisis adalah jalan arteri Jl. Perintis Kemerdekaan, Semarang, dengan campuran aspal yang terdiri dari aspal penetrasi 60/70 dan agregat alam. Functional Unit yang digunakan untuk mengkuantifikasi dampak lingkungan adalah 1 km panjang jalan dengan lebar jalan 3,5 meter, menggunakan campuran HMA sesuai standar nasional Indonesia. LCA dalam penelitian ini

difokuskan pada fase produksi raw material (bahan mentah), transportasi raw material, mixing asphalt (pencampuran), transportasi ke site, dan konstruksi, dengan pendekatan cradle-to-lying.

2.2. Inventaris Siklus Hidup

Material Bagian ini menjelaskan sumber data input/output dari proses LCA. Basis data yang digunakan adalah Ecoinvent versi 3.8 (Ecoinvent, 2021), diproses menggunakan perangkat lunak SimaPro 9.3.3.

Pada fase raw material, aspal cair dimodelkan menggunakan dataset Ecoinvent "Bitumen adhesive compound hot {RoW}| production | Cut-off U", sementara agregat alam dimodelkan menggunakan dataset "Gravel crushed {RoW}| production | Cut-off U". Pemodelan ini dilakukan untuk memastikan akurasi dalam perhitungan dampak lingkungan yang terkait dengan material dasar yang digunakan dalam campuran aspal.

Pada fase transportasi Bahan Baku ke Asphalt Mixing Plant (AMP): Jarak transportasi bahan mentah ke AMP diperoleh melalui wawancara dengan manajer proyek di lokasi studi kasus. Semua fase transportasi bahan baku dimodelkan menggunakan dataset dari Ecoinvent v3, yaitu "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return". Unit yang digunakan adalah ton-kilometer (tkm), yang dihitung dengan mengalikan berat material dengan jarak transportasi ke AMP. **Tabel 1** menyajikan ringkasan jarak dan ukuran angkutan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Jarak dan besaran ukuran angkutan barang pada fase transportasi raw material

Binder Course							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Aspal	35	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74
Aggregat	10	5568.36	4980.36	4392.36	3804.36	3216.36	2628.36
RAP	15	0	882	1764	2646	3528	4410
Base Course							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Aspal	35	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25
Aggregat	10	12337.5	11103.75	9870	8636.25	7402.5	6168.75
RAP	15	0	1850.625	3701.25	5551.875	7402.5	9253.125

Pada fase pembuatan campuran aspal, proses pencampuran aspal dilakukan menggunakan pabrik pencampuran batch dengan kapasitas 160 ton/jam, yang membutuhkan daya termal sebesar 12.000 kWh (Santos, Candido, Baulé, Oliveira, & Thives, 2020). Setiap ton campuran aspal mengonsumsi energi sebesar 75 kWh. Untuk campuran HMA yang mengandung RAP, suhu pencampuran lebih tinggi diperlukan untuk memastikan campuran dapat dipadatkan dengan baik, karena aspal pada RAP cenderung lebih kaku dibandingkan aspal baru. Penambahan RAP menyebabkan peningkatan konsumsi energi sebesar 5% untuk campuran dengan 20-40% RAP, dan 10% untuk campuran dengan 50% RAP. Untuk pemodelan energi ini, digunakan dataset "District heat, light fuel oil, at industrial furnace" dari Ecoinvent. Pada fase transportasi ke lokasi konstruksi, jarak transportasi dari AMP ke lokasi konstruksi diasumsikan sama untuk semua campuran aspal, yaitu 16 km. Transportasi ini dimodelkan dengan

dataset "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return" untuk memodelkan emisi transportasi. Pada tahap konstruksi, berbagai jenis alat berat digunakan untuk operasi pengaspalan, pemadatan, dan penggilingan. Produktivitas dan daya mesin untuk setiap jenis alat berat ditampilkan di **Tabel 2**. Emisi yang dihasilkan dihitung berdasarkan tingkat utilitas alat berat, yang dikalikan dengan daya mesin untuk menghitung konsumsi energi. Emisi gas rumah kaca (GWP) dihitung menggunakan dataset global "Diesel burned in building machine {GLO}" dari Ecoinvent.

Tabel 2. Data alat pada fase konstruksi

Mesin	Model	Produktivitas	Tenaga mesin (kW)
Asphalt Paver	BOMAG BF 600 P-3	1.530 m ² /jam	129
Tandem Roller	DYNAPAC CC2200	800 m ² /jam	75
Pneumatic Roller	DYNAPAC CP275	2.300 m ² /jam	93

2.3. Kategori dampak yang dievaluasi

Pemodelan karakterisasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dilakukan dengan menerapkan metode penilaian dampak ReCiPe Midpoint, menurut perspektif hierarki (21). Secara khusus, kategori dampak berikut dipertimbangkan: Global warming, Stratospheric ozone depletion, Ionizing radiation, Ozone formation, Fine particulate matter formation, Ozone formation, Terrestrial ecosystems, Terrestrial acidification, Freshwater eutrophication, Marine eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity, Human non-carcinogenic toxicity, Land use, Mineral resource scarcity, Fossil resource scarcity, Water consumption. Dalam analisis ini, perangkat lunak Simapro 9.0 yang dikembangkan oleh Pre Sustainability, Belanda, digunakan untuk memodelkan sistem atau proses guna mengevaluasi efek penambahan RAP pada dampak environmental (22) Simapro adalah perangkat lunak komersial yang digunakan untuk pemodelan, penghitungan, dan visualisasi material serta sistem aliran energi. Alat ini digunakan untuk menganalisis aliran proses di seluruh siklus hidup suatu produk.

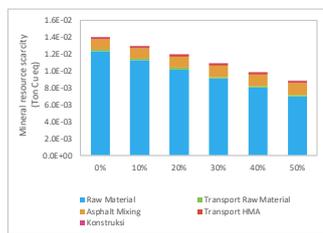
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Penelitian ini mengkaji dampak lingkungan dari penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan berbagai persentase (0% hingga 50%). Melalui analisis menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), diperoleh data yang mencakup 18 kategori dampak lingkungan yang diukur berdasarkan metode Recipe Midpoint H. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan RAP memberikan pengaruh positif terhadap penurunan dampak lingkungan pada sebagian besar kategori (**Gambar 2**).

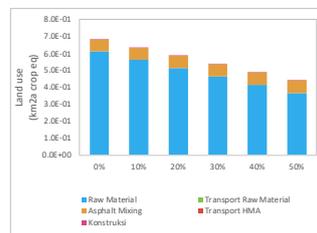
Terrestrial ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	611.55	611.08	637.60	637.13	636.66	663.17
Freshwater ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47
Marine ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.05	1.05	1.01	0.98	0.98
Human carcinogenic toxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.03	0.98	0.92	0.86	0.82
Human non-carcinogenic toxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	20.77	20.15	19.89	19.26	18.64	18.38
Land use (km ² a crop eq)	km ² a crop eq	0.68	0.63	0.59	0.54	0.49	0.44
Mineral resource scarcity (Ton Cu eq)	Ton Cu eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fossil resource scarcity (Ton oil eq)	Ton oil eq	124.76	124.43	124.98	124.64	124.30	124.85
Water consumption (km ³)	km ³	1.19	1.12	1.06	1.00	0.93	0.88

Dari 18 kategori dampak yang dianalisis, penurunan dampak lingkungan yang signifikan pada enam kategori utama (Mineral resource scarcity, Land use, Water consumption, Human carcinogenic toxicity, Freshwater eutrophication, dan Freshwater ecotoxicity) terutama disebabkan oleh pengurangan penggunaan bahan baku baru melalui substitusi RAP. Pengurangan penggunaan agregat alam dengan RAP secara signifikan mengurangi dampak lingkungan pada kategori Mineral resource scarcity, Land use, dan Water consumption (**Gambar 3.a-c**).

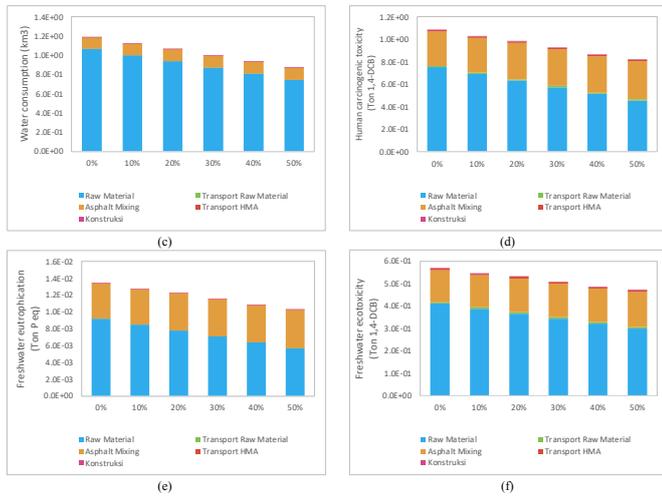
Namun demikian, fase pencampuran aspal (asphalt mixing) dengan RAP menunjukkan adanya sedikit peningkatan dampak pada beberapa kategori. Sebagai contoh, pada kategori Freshwater ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity, dan Marine ecotoxicity (**Gambar 3.d-f**), fase pencampuran memiliki kontribusi yang lebih besar dibandingkan fase lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun substitusi agregat alam dengan RAP menurunkan dampak lingkungan secara keseluruhan, peningkatan konsumsi energi dan emisi dari proses asphalt mixing tetap harus diperhitungkan.



(a)



(b)



Gambar 3. Nilai dampak lingkungan pada impact category: a) Mineral resource scarcity, b) Land use, c) Water consumption, d) Human carcinogenic toxicity, e) Freshwater eutrophication, dan f) Freshwater ecotoxicity

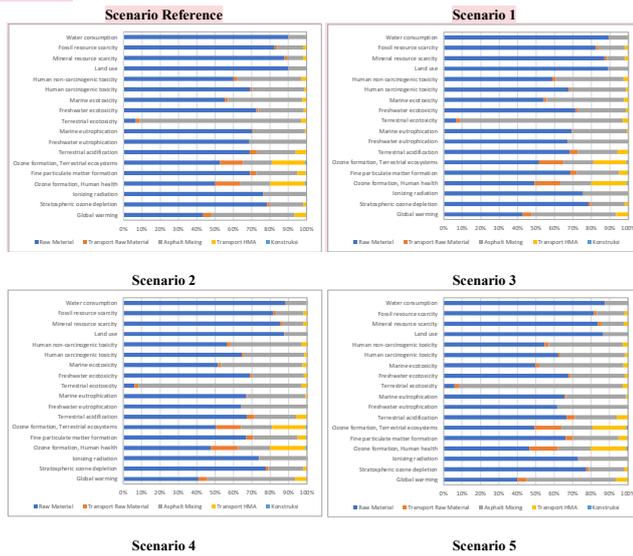
Penelitian ini juga mengidentifikasi kontribusi masing-masing fase dalam siklus hidup perkerasan terhadap dampak lingkungan untuk setiap skenario. Pada skenario referensi, yaitu campuran beraspal tanpa kandungan RAP, fase produksi raw material mendominasi kontribusi terhadap dampak lingkungan pada hampir semua impact category, dengan kontribusi berkisar antara 50-90%. Secara spesifik, kontribusi terbesar dari raw material muncul pada kategori global warming (44%), ionizing radiation (76%), dan land use (90%), karena semua bahan yang digunakan adalah bahan baru. Namun, pada kategori Global Warming dan Terrestrial Ecotoxicity, fase asphalt mixing menjadi penyumbang dampak terbesar, masing-masing sebesar 45% dan 88%, serta menyumbang 23% pada kategori fine particulate matter formation. Fase transportasi HMA memiliki kontribusi kecil, sekitar 6%, untuk beberapa kategori.

Pada skenario 1 dan 2, dengan penambahan 10% dan 20% RAP, fase produksi raw material masih mendominasi kontribusi pada sebagian besar impact category, meskipun kontribusi ini menurun menjadi 49-89%, terutama pada kategori global warming yang turun menjadi 43%, dan land use yang turun menjadi 89%. Penurunan ini disebabkan oleh pengurangan penggunaan agregat alami yang sebagian digantikan oleh RAP. Pencampuran aspal tetap menyumbang kontribusi besar (45%), sedangkan fase transportasi tetap stabil tanpa perubahan signifikan. Pada skenario 2 dan 3, dengan penambahan RAP sebesar 20-30%, kontribusi fase raw material terus menurun, dengan global warming turun menjadi 41-

Commented [HP10]: apakah skenario dapat diganti dengan parameter kuantitatif?

Commented [HP11]: format penulisan belum mengikuti template

40% dan land use menjadi 88-87%. Namun, fase asphalt mixing tetap dominan dengan kontribusi 48% terhadap global warming, dan sedikit peningkatan kontribusi terjadi pada fase transportasi karena lebih banyak RAP yang diangkut. Peningkatan kebutuhan suhu pencampuran aspal sebesar 5% juga menyebabkan peningkatan konsumsi energi pada fase ini. Pada skenario 4, dengan 40% RAP, kontribusi fase raw material dan asphalt mixing mulai berimbang pada sebagian besar impact category. Raw material menyumbang 39% pada global warming dan 85% pada land use, sedangkan asphalt mixing meningkat kontribusinya menjadi 49%. Peningkatan suhu pencampuran sebesar 10% turut mempengaruhi peningkatan dampak dari fase ini. Transportasi tetap memberikan kontribusi stabil di sekitar 6-7%. Pada skenario 5, dengan 50% RAP, fase asphalt mixing menjadi penyumbang terbesar pada sebagian besar impact category. Kontribusinya mencapai 50% untuk global warming dan freshwater eutrophication, serta 50% untuk marine ecotoxicity, sementara fase terrestrial ecotoxicity mendominasi hingga 90%. Penggunaan raw material terus menurun, dengan kontribusi terhadap global warming turun menjadi 37% dan land use menjadi 83%, sedangkan fase transportasi tetap stabil di sekitar 6-7%.



4. Bukti konfirmasi review dan hasil review kedua



fardzanela fardzanela <fardzanela@live.undip.ac.id>

[Jsil] New notification from Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan

Ms Joana Febrita <jurnal@apps.ipb.ac.id>
Reply-To: "[Admin JSIL]" <jsil_ipb@apps.ipb.ac.id>
To: Fardzanela Suwanto <fardzanela@live.undip.ac.id>

Fri, Oct 18, 2024 at 2:59 PM

You have a new notification from Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan:

You have been added to a discussion titled "Saran dari Editor" regarding the submission "Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment".

Link: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil/authorDashboard/submission/59516>

[Admin JSIL]

dan Lingkungan <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil> email: jsil_ipb@apps.ipb.ac.id Editor Jurnal Teknik Sipil

Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment

Abstrak: Penelitian ini mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal dengan metode Life Cycle Assessment (LCA). Variasi RAP mulai dari 0% hingga 50% dianalisis terhadap 18 kategori dampak, termasuk Global Warming, Water Consumption, dan Resource Scarcity. Hasil menunjukkan bahwa RAP mengurangi Mineral Resource Scarcity hingga 37,1%, Land Use 35,2%, dan Water Consumption sebesar 26,2%, dengan kontribusi terbesar berasal dari pengurangan penggunaan material baru. Namun, RAP meningkatkan dampak pada Terrestrial Ecotoxicity akibat konsumsi energi yang lebih tinggi pada fase pencampuran. Penelitian ini mendukung penggunaan RAP untuk meningkatkan keberlanjutan infrastruktur jalan dengan optimasi proses pencampuran untuk meminimalkan dampak negatif.

Kata kunci: RAP, Life Cycle Assessment, dampak lingkungan, kontribusi relatif.

1. Pendahuluan

Pembangunan jalan raya telah menggunakan sumber daya alam dalam jumlah yang besar, yang kini menimbulkan perhatian terhadap keberlanjutan dalam sektor infrastruktur jalan. Selama beberapa tahun terakhir, emisi yang dihasilkan dari konstruksi jalan meningkat secara signifikan, terutama di negara-negara berkembang yang tengah mempercepat pembangunan infrastruktur untuk mendukung pertumbuhan ekonomi (1). Salah satu tantangan utama dalam rekayasa perkerasan adalah memenuhi permintaan sumber daya lingkungan yang terus meningkat, baik dalam proses konstruksi maupun pemeliharaan, dengan tetap memastikan keberlanjutan proyek tersebut (2). Lebih lanjut, dalam konteks pemeliharaan jalan, sejumlah besar material limbah dari campuran beraspal telah dihasilkan, namun pemanfaatannya dalam desain perkerasan jalan masih terbatas (3), dengan (4) melaporkan bahwa jutaan ton aspal terbuang sia-sia akibat penggantian perkerasan jalan yang rusak. Namun, material limbah ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pengganti agregat pada konstruksi perkerasan jalan baru. Material hasil milling dari proses pemeliharaan dan rehabilitasi lapisan aspal, yang dikenal sebagai RAP, dapat didaur ulang dan diintegrasikan ke dalam campuran aspal baru. (5) menawarkan solusi potensial untuk meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi jalan dan mengatasi tantangan-tantangan lingkungan yang dihadapi oleh sektor ini.

Lebih jauh lagi, mengenai performa aspal dengan campuran RAP, penelitian terkini juga menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran perkerasan aspal dapat memberikan performa yang sebanding dengan Hot Mix Asphalt (HMA) konvensional, sebagaimana dilaporkan dalam beberapa

Diterima: hh mm yyyy
Diperbaiki: hh mm yyyy
Disetujui: hh mm yyyy

Commented [rvr1]: [1]....perhatikan template/panduan

studi (6–8). Beberapa riset bahkan meneliti efek kandungan RAP pada perkerasan jalan sampai dengan prosentase 50% (9,10). Namun, meskipun potensi RAP dari segi teknis sangat menjanjikan, penggunaannya dalam produksi aspal daur ulang memerlukan penyesuaian teknis, terutama dalam hal suhu pencampuran yang lebih tinggi dibandingkan dengan HMA biasa. Laporan NCHRP menyarankan agar suhu pemanasan awal material RAP tidak melebihi 110°C, namun suhu pencampuran harus mencapai 165–175°C agar campuran daur ulang dapat dipadatkan dengan baik (11). Peningkatan suhu ini membawa konsekuensi pada peningkatan konsumsi energi, yang pada akhirnya mempengaruhi jejak lingkungan (environmental footprint) dari proses produksi campuran aspal.

Keberlanjutan campuran aspal yang digunakan sebagai bahan perkerasan jalan dalam infrastruktur transportasi harus mempertimbangkan efisiensi dalam hal dampak lingkungan. Oleh karena itu, pengenalan penggunaan material tambahan ke dalam campuran aspal harus selalu disertai dengan penilaian siklus hidup dengan LCA. Dampak dan jejak lingkungan dari penggunaan suatu produk atau proyek pembangunan dapat dianalisa dengan metode ini. Selain itu, literatur ilmiah di bidang LCA perkerasan jalan terus berkembang. Banyak penelitian menunjukkan bahwa LCA adalah metodologi yang sangat berguna untuk mendukung pemilihan teknik perkerasan yang optimal, mencakup seluruh fase pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, renovasi, hingga pengelolaan limbah (12). (2,13) menyebutkan bahwa penerapan LCA pada perkerasan jalan semakin meningkat, yang mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap penggunaan pendekatan siklus hidup dalam menilai beban lingkungan dari setiap tahap siklus hidup perkerasan, dari fase konstruksi hingga akhir masa pakai.

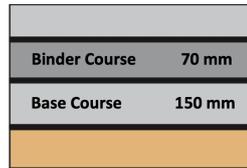
Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengintegrasikan analisis LCA guna mengevaluasi penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dari penggunaan energi yang lebih tinggi dalam proses pencampurannya. LCA akan digunakan untuk menilai sejauh mana penggunaan RAP mempengaruhi keberlanjutan proyek perkerasan jalan di Indonesia, dengan fokus pada kategori dampak lingkungan seperti emisi karbon, toksisitas, serta penggunaan sumber daya.

2. Metode

Kerangka metodologi LCA ini didasarkan pada standar ISO 14040 (14), yang merekomendasikan langkah-langkah berikut: definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi hasil. Sebagai langkah awal, informasi mengenai material dan desain struktur perkerasan digunakan sebagai data masukan untuk LCA.

2.1. Definisi Ruang Lingkup

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan campuran aspal dengan RAP. Berbagai persentase RAP dalam campuran dibandingkan dengan struktur perkerasan yang disusun dengan HMA konvensional (tanpa RAP), untuk melihat bagaimana RAP berdampak pada lingkungan. Dalam studi ini, RAP tidak digunakan pada lapisan permukaan jalan karena penggunaannya pada permukaan tidak direkomendasikan. Sebaliknya, RAP diaplikasikan pada lapisan binder dan base course, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Persentase RAP yang digunakan bervariasi antara 0% (referensi), 10% (Scenario 1), 20% (Scenario 2), 30% (Scenario 3), 40% (Scenario 4), dan 50% (Scenario 5). Diasumsikan bahwa densitas massa campuran dengan dan tanpa RAP tetap sama seperti yang direkomendasikan pada penelitian sebelumnya (Mukherjee 2016; Kaseer, Arámbula-Mercado, & Martín 2019).



Gambar 1. Studi kasus penampang perkerasan jalan

Commented [rvr2]: Sebaiknya gunakan bahasa indonesia, kecuali utk istilah yang dapat menimbulkan perbedaan makna

Lokasi pembangunan jalan yang dianalisis adalah jalan arteri Jl. Perintis Kemerdekaan, Semarang, dengan campuran aspal yang terdiri dari aspal penetrasi 60/70 dan agregat alam. Functional Unit yang digunakan untuk mengkuantifikasi dampak lingkungan adalah 1 km panjang jalan dengan lebar jalan 3,5 meter, menggunakan campuran HMA sesuai standar nasional Indonesia. LCA dalam penelitian ini difokuskan pada fase produksi raw material (bahan mentah), transportasi raw material, mixing asphalt (pencampuran), transportasi ke site, dan konstruksi, dengan pendekatan cradle-to-lyng.

2.2. Inventaris Siklus Hidup

Material Bagian ini menjelaskan sumber data input/output dari proses LCA. Basis data yang digunakan adalah Ecoinvent versi 3.8 (Ecoinvent, 2021), diproses menggunakan perangkat lunak SimaPro 9.3.3.

Pada fase raw material, aspal cair dimodelkan menggunakan dataset Ecoinvent "Bitumen adhesive compound hot {RoW}| production | Cut-off U", sementara agregat alam dimodelkan menggunakan dataset "Gravel crushed {RoW}| production | Cut-off U". Pemodelan ini dilakukan untuk memastikan akurasi dalam perhitungan dampak lingkungan yang terkait dengan material dasar yang digunakan dalam campuran aspal.

Pada fase transportasi Bahan Baku ke Asphalt Mixing Plant (AMP): Jarak transportasi bahan mentah ke AMP diperoleh melalui wawancara dengan manajer proyek di lokasi studi kasus. Semua fase transportasi bahan baku dimodelkan menggunakan dataset dari Ecoinvent v3, yaitu "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return". Unit yang digunakan adalah ton-kilometer (tkm), yang dihitung dengan mengalikan berat material dengan jarak transportasi ke AMP. Tabel 1 menyajikan ringkasan jarak dan ukuran angkutan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Jarak dan besaran ukuran angkutan barang pada fase transportasi raw material

Binder Course							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Aspal	35	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74
Agregat	10	5568.36	4980.36	4392.36	3804.36	3216.36	2628.36
RAP	15	0	882	1764	2646	3528	4410
Base Course							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5

Commented [rvr3]: Indonesia

Aspal	35	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25
Aggregat	10	12337.5	11103.75	9870	8636.25	7402.5	6168.75
RAP	15	0	1850.625	3701.25	5551.875	7402.5	9253.125

Pada fase pembuatan campuran aspal, proses pencampuran aspal dilakukan menggunakan pabrik pencampuran batch dengan kapasitas 160 ton/jam, yang membutuhkan daya termal sebesar 12.000 kWh (Santos, Candido, Baulé, Oliveira, & Thives, 2020). Setiap ton campuran aspal mengonsumsi energi sebesar 75 kWh. Untuk campuran HMA yang mengandung RAP, suhu pencampuran lebih tinggi diperlukan untuk memastikan campuran dapat dipadatkan dengan baik, karena aspal pada RAP cenderung lebih kaku dibandingkan aspal baru. Penambahan RAP menyebabkan peningkatan konsumsi energi sebesar 5% untuk campuran dengan 20-40% RAP, dan 10% untuk campuran dengan 50% RAP. Untuk pemodelan energi ini, digunakan dataset "District heat, light fuel oil, at industrial furnace" dari Ecoinvent. Pada fase transportasi ke lokasi konstruksi, jarak transportasi dari AMP ke lokasi konstruksi diasumsikan sama untuk semua campuran aspal, yaitu 16 km. Transportasi ini dimodelkan dengan dataset "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return" untuk memodelkan emisi transportasi. Pada tahap konstruksi, berbagai jenis alat berat digunakan untuk operasi pengaspalan, pemadatan, dan penggilingan. Produktivitas dan daya mesin untuk setiap jenis alat berat ditampilkan di **Tabel 2**. Emisi yang dihasilkan dihitung berdasarkan tingkat utilitas alat berat, yang dikalikan dengan daya mesin untuk menghitung konsumsi energi. Emisi gas rumah kaca (GWP) dihitung menggunakan dataset global "Diesel burned in building machine {GLO}" dari Ecoinvent.

Commented [rvr4]: Sitasi? Cek format

Tabel 2. Data alat pada fase konstruksi

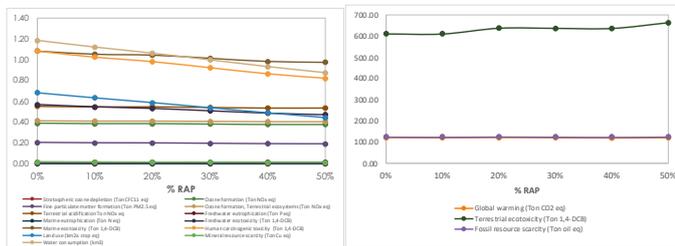
Mesin	Model	Produktivitas	Tenaga mesin (kW)
Asphalt Paver	BOMAG BF 600 P-3	1.530 m ² /jam	129
Tandem Roller	DYNAPAC CC2200	800 m ² /jam	75
Pneumatic Roller	DYNAPAC CP275	2.300 m ² /jam	93

2.3. Kategori dampak yang dievaluasi

Pemodelan karakterisasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dilakukan dengan menerapkan metode penilaian dampak ReCiPe Midpoint, menurut perspektif hierarki (15). Secara khusus, kategori dampak berikut dipertimbangkan: Global warming, Stratospheric ozone depletion, Ionizing radiation, Ozone formation, Fine particulate matter formation, Ozone formation, Terrestrial ecosystems, Terrestrial acidification, Freshwater eutrophication, Marine eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity, Human non-carcinogenic toxicity, Land use, Mineral resource scarcity, Fossil resource scarcity, Water consumption. Dalam analisis ini, perangkat lunak Simapro 9.0 yang dikembangkan oleh Pre Sustainability, Belanda, digunakan untuk memodelkan sistem atau proses guna mengevaluasi efek penambahan RAP pada dampak environmental (16) Simapro adalah perangkat lunak komersial yang digunakan untuk pemodelan, penghitungan, dan visualisasi material serta sistem aliran energi. Alat ini digunakan untuk menganalisis aliran proses di seluruh siklus hidup suatu produk.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Penelitian ini mengkaji dampak lingkungan dari penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan berbagai persentase (0% hingga 50%). Melalui analisis menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), diperoleh data yang mencakup 18 kategori dampak lingkungan yang diukur berdasarkan metode Recipe Midpoint H. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan RAP memberikan pengaruh positif terhadap penurunan dampak lingkungan pada sebagian besar kategori (**Gambar 2**).



Gambar 2. Dampak lingkungan pada tiap kenaikan presentase RAP

Sebagaimana juga ditunjukkan pada **Tabel 3**, kategori dampak seperti Mineral resource scarcity, Land use, Water consumption, Human carcinogenic toxicity, Freshwater eutrophication, Freshwater ecotoxicity, dan Marine eutrophication mengalami penurunan yang signifikan pada skenario penggunaan 50% RAP. Penurunan terbesar terjadi pada kategori dengan penurunan sebesar 37,1%. Penurunan dampak lingkungan pada kategori lain juga signifikan, yakni sebesar 35,2% untuk Land use, 26,2% untuk Water consumption, serta penurunan lebih lanjut pada Human carcinogenic toxicity (24,4%), Freshwater eutrophication (23,4%), dan Freshwater ecotoxicity (17,1%). Kategori lain seperti Ionizing radiation, Human non-carcinogenic toxicity, Marine ecotoxicity, dan Fine particulate matter formation menunjukkan penurunan yang lebih moderat. Pada skenario 50% RAP, masing-masing kategori ini mengalami penurunan sebesar 11,8%, 11,5%, 10,1%, dan 6,1%. Meskipun penurunan ini tidak sebesar kategori sebelumnya, hasil tersebut tetap menunjukkan adanya kontribusi positif terhadap pengurangan dampak lingkungan dari penggunaan RAP. Sebaliknya, kategori Global warming dan Fossil resource scarcity menunjukkan pola yang lebih fluktuatif dan tidak konsisten seiring dengan peningkatan persentase RAP. Di sisi lain, kategori Terrestrial ecotoxicity justru mengalami peningkatan dampak seiring dengan bertambahnya RAP, yang memerlukan analisis lebih lanjut mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi hasil tersebut.

Tabel 3. Nilai dampak lingkungan pada skenario penelitian

Impact category	Unit	Scenario Reference	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Global warming (Ton CO2 eq)	Ton CO2 eq	121.09	119.75	121.16	119.82	118.48	119.88
Stratospheric ozone depletion (Ton CFC11 eq)	Ton CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ionizing radiation (103 Co-60 eq)	1000 kBq Co-60 eq	5.59	5.43	5.34	5.18	5.02	4.93
Ozone formation (Ton NOx eq)	Ton NOx eq	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Fine particulate matter formation (Ton PM2.5 eq)	Ton PM2.5 eq	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19

Commented [rvr5]: Sebaiknya menggunakan bahasa Indonesia RAP, sebaiknya ditulis lengkap untuk Sb x

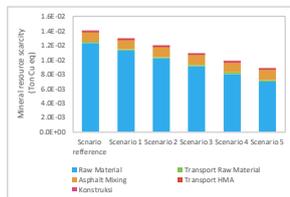
Commented [rvr6]: Gunakan huruf kecil dan ditulis italic

Ozone formation, Terrestrial ecosystems (Ton NOx eq)	Ton NOx eq	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40
Terrestrial acidification (Ton NOx eq)	Ton SO2 eq	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54
Freshwater eutrophication (Ton P eq)	Ton eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Marine eutrophication (Ton N eq)	Ton N eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Terrestrial ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	611.55	611.08	637.60	637.13	636.66	663.17
Freshwater ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47
Marine ecotoxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.05	1.05	1.01	0.98	0.98
Human carcinogenic toxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.03	0.98	0.92	0.86	0.82
Human non-carcinogenic toxicity (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	20.77	20.15	19.89	19.26	18.64	18.38
Land use (km2a crop eq)	km2a crop eq	0.68	0.63	0.59	0.54	0.49	0.44
Mineral resource scarcity (Ton Cu eq)	Ton Cu eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fossil resource scarcity (Ton oil eq)	Ton oil eq	124.76	124.43	124.98	124.64	124.30	124.85
Water consumption (km3)	km3	1.19	1.12	1.06	1.00	0.93	0.88

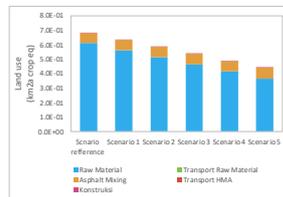
Commented [rvr7]: Indonesia

Dari 18 kategori dampak yang dianalisis, penurunan dampak lingkungan yang signifikan pada enam kategori utama (Mineral resource scarcity, Land use, Water consumption, Human carcinogenic toxicity, Freshwater eutrophication, dan Freshwater ecotoxicity) terutama disebabkan oleh pengurangan penggunaan bahan baku baru melalui substitusi RAP. Pengurangan penggunaan agregat alam dengan RAP secara signifikan mengurangi dampak lingkungan pada kategori Mineral resource scarcity, Land use, dan Water consumption (**Gambar 3.a-c**).

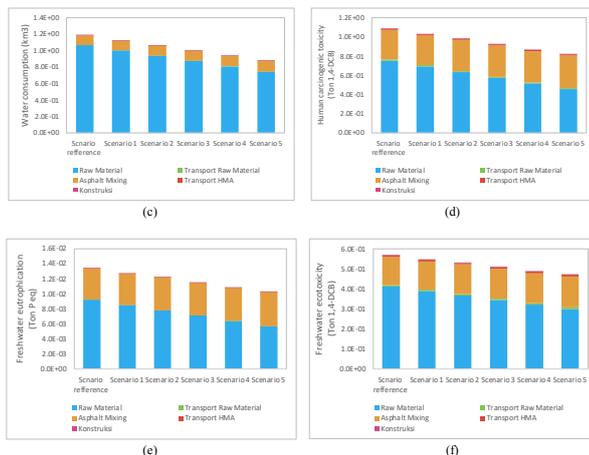
Namun demikian, fase pencampuran aspal (asphalt mixing) dengan RAP menunjukkan adanya sedikit peningkatan dampak pada beberapa kategori. Sebagai contoh, pada kategori Freshwater ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity, dan Marine ecotoxicity (**Gambar 3.d-f**), fase pencampuran memiliki kontribusi yang lebih besar dibandingkan fase lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun substitusi agregat alam dengan RAP menurunkan dampak lingkungan secara keseluruhan, peningkatan konsumsi energi dan emisi dari proses asphalt mixing tetap harus diperhitungkan.



(a)



(b)



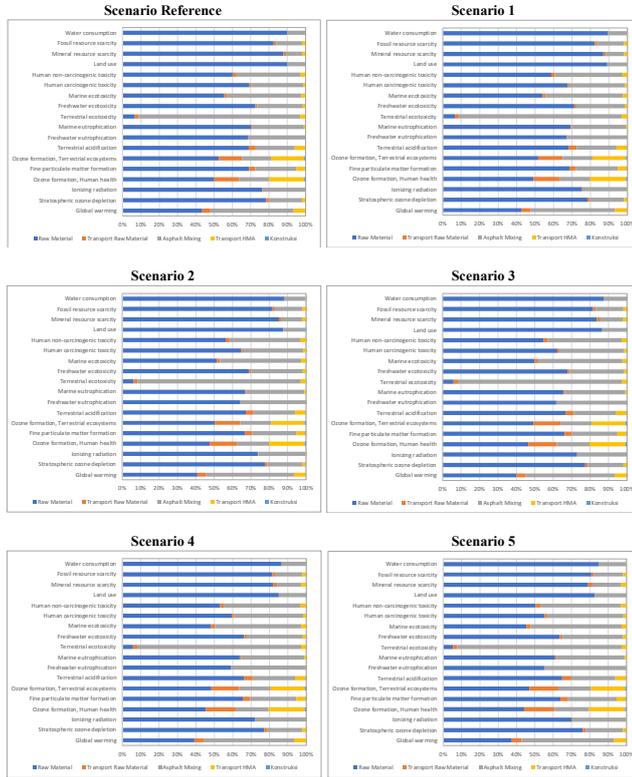
Gambar 3. Nilai dampak lingkungan pada impact category: a) Mineral resource scarcity, b) Land use, c) Water consumption, d) Human carcinogenic toxicity, e) Freshwater eutrophication, dan f) Freshwater ecotoxicity

Commented [rvr8]: Judul gambar tidak boleh terpisah dari gambar

Penelitian ini juga mengidentifikasi kontribusi masing-masing fase dalam siklus hidup perkerasan terhadap dampak lingkungan untuk setiap skenario. Pada skenario referensi, yaitu campuran beraspal tanpa kandungan RAP, fase produksi raw material mendominasi kontribusi terhadap dampak lingkungan pada hampir semua impact category, dengan kontribusi berkisar antara 50-90%. Secara spesifik, kontribusi terbesar dari raw material muncul pada kategori global warming (44%), ionizing radiation (76%), dan land use (90%), karena semua bahan yang digunakan adalah bahan baru. Namun, pada kategori Global Warming dan Terrestrial Ecotoxicity, fase asphalt mixing menjadi penyumbang dampak terbesar, masing-masing sebesar 45% dan 88%, serta menyumbang 23% pada kategori fine particulate matter formation. Fase transportasi HMA memiliki kontribusi kecil, sekitar 6%, untuk beberapa kategori.

Pada skenario 1 dan 2, dengan penambahan 10% dan 20% RAP, fase produksi raw material masih mendominasi kontribusi pada sebagian besar impact category, meskipun kontribusi ini menurun menjadi 49-89%, terutama pada kategori global warming yang turun menjadi 43%, dan land use yang turun menjadi 89%. Penurunan ini disebabkan oleh pengurangan penggunaan agregat alami yang sebagian digantikan oleh RAP. Pencampuran aspal tetap menyumbang kontribusi besar (45%), sedangkan fase transportasi tetap stabil tanpa perubahan signifikan. Pada skenario 2 dan 3, dengan penambahan RAP sebesar 20-30%, kontribusi fase raw material terus menurun, dengan global warming turun menjadi 41-40% dan land use menjadi 88-87%. Namun, fase asphalt mixing tetap dominan dengan kontribusi 48% terhadap global warming, dan sedikit peningkatan kontribusi terjadi pada fase transportasi karena lebih banyak RAP yang diangkut. Peningkatan kebutuhan suhu pencampuran aspal sebesar 5% juga menyebabkan peningkatan konsumsi energi pada fase ini. Pada skenario 4, dengan 40% RAP, kontribusi fase raw material dan asphalt mixing mulai berimbang pada sebagian besar impact category. Raw material menyumbang 39% pada global warming dan 85% pada land use, sedangkan asphalt mixing meningkat kontribusinya menjadi 49%. Peningkatan suhu pencampuran sebesar 10% turut mempengaruhi peningkatan dampak dari fase ini. Transportasi tetap memberikan kontribusi stabil di sekitar 6-7%. Pada skenario 5, dengan 50% RAP, fase asphalt mixing menjadi penyumbang terbesar pada sebagian besar impact category. Kontribusinya mencapai 50% untuk global warming dan

freshwater eutrophication, serta 50% untuk marine ecotoxicity, sementara fase terrestrial ecotoxicity mendominasi hingga 90%. Penggunaan raw material terus menurun, dengan kontribusi terhadap global warming turun menjadi 37% dan land use menjadi 83%, sedangkan fase transportasi tetap stabil di sekitar 6-7%.



Gambar 4. Kontribusi relatif fase siklus hidup pada tiap skenario penambahan RAP

Commented [rvr9]: bahasa

Keseluruhan hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP pada campuran aspal memberikan dampak positif terhadap lingkungan, terutama dalam hal penghematan sumber daya alam (raw material). Namun, pada saat yang sama, proses mixing aspal untuk campuran yang mengandung RAP akan meningkatkan dampak lingkungan yang disebabkan oleh kenaikan suhu pencampuran. Sehingga

peningkatan dampak pada fase pencampuran menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut dalam proses produksi campuran aspal dengan RAP.

4. Kesimpulan

Kesimpulan Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran aspal dapat secara signifikan mengurangi dampak lingkungan, terutama dalam kategori yang terkait dengan penggunaan sumber daya alam. Penggunaan RAP hingga 50% dalam campuran aspal mengurangi Mineral Resource Scarcity sebesar 37,1%, Land Use sebesar 35,2%, dan Water Consumption sebesar 26,2%. Kontribusi relatif terbesar terhadap pengurangan dampak berasal dari penurunan penggunaan bahan baku baru, yang sangat berpengaruh pada kategori Mineral Resource Scarcity dan Land Use. Namun, peningkatan RAP juga menyebabkan peningkatan pada Terrestrial Ecotoxicity, yang berhubungan dengan fase asphalt mixing. Fase ini memerlukan lebih banyak energi karena suhu pencampuran yang lebih tinggi, yang berkontribusi terhadap peningkatan dampak toksisitas. Oleh karena itu, optimasi pada proses pencampuran perlu dilakukan untuk mengurangi dampak negatif tersebut. Meskipun demikian, hasil penelitian ini mendukung penggunaan RAP sebagai solusi berkelanjutan untuk pembangunan infrastruktur jalan, dengan pengurangan dampak lingkungan yang signifikan, terutama pada fase material.

Penelitian ini berkontribusi pada pemahaman tentang dampak penggunaan RAP dan memberikan dasar untuk pengembangan kebijakan yang mendukung penerapan material daur ulang dalam infrastruktur jalan di Indonesia.

5. Daftar Pustaka

1. World Bank. Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation, A Toolkit for Developing Countries; ROADEO Toolkit User Manual User Manual. A World Bank Rep. 2011;
2. Santero NJ, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2011;55(9–10):810–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>
3. Zhao Z, Xiao F, Amirkhanian S. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste Manag* [Internet]. 2020;108:78–105. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>
4. Dong Q, Huang B. Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material. *J Mater Civ Eng*. 2014;26(2):379–83.
5. Audrey Copeland. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Rep No FHWA-HRT-11-021. 2011;(FHWA);McLean, Virginia.
6. Zaumanis M, Mallick RB. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *Int J Pavement Eng* [Internet]. 2015;16(1):39–55. Available from: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
7. Lo Presti D, Jiménez Del Barco Carrión A, Airey G, Hajj E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. *J Clean Prod* [Internet]. 2016;131:43–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093>
8. Porot L, Di Nolfo M, Polastro E, Tulcinsky S. Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent. In: Porot, Laurent, et al "Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent" Proceedings of the 6th Euraspalt Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic; 2017. p. 1–8.
9. D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, Baumgardner G, Corrigan M, Cowser J, et al. Warm-Mix asphalt: European Practice. *Fed Highw Adm*. 2008;68.
10. Vaitkus A, Vorobjovas V, Žalimienė L, Žiliūtė L. The research on the use of warm mix asphalt for asphalt Pavement structures Road traffic noise mitigation under development of noiseless pavements View project Modular pavements View project THE RESEARCH ON THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR ASPHALT PAVEMENT. In: Proceedings of the XXVII International Baltic Road Conference [Internet]. Riga, Latvia; 2009. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/237582194>

Commented [rvr10]: Format referensi belum sesuai

5. Bukti konfirmasi submit revisi kedua, respon kepada reviewer, dan artikel yang diresubmit

Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment

Abstrak: Pembangunan infrastruktur jalan raya memerlukan sumber daya alam yang signifikan dan menghasilkan dampak lingkungan yang tinggi, seperti emisi karbon dan penggunaan air. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah diidentifikasi sebagai salah satu solusi berkelanjutan untuk mengurangi konsumsi material baru. Penelitian ini menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan RAP dengan variasi persentase 0% hingga 50%, dan dianalisis terhadap 18 kategori dampak. Data dikumpulkan menggunakan perangkat lunak SimaPro dengan basis data Ecoinvent. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RAP mampu mengurangi Kelangkaan Sumber Daya Mineral sebesar 37,1%, Penggunaan Lahan sebesar 35,2%, dan Konsumsi Air sebesar 26,2%, dengan kontribusi terbesar berasal dari pengurangan penggunaan material baru. Sebaliknya, peningkatan RAP menyebabkan peningkatan pada kategori Ekotoksitas Terrestrial akibat konsumsi energi lebih tinggi pada fase pencampuran. Penelitian ini menunjukkan bahwa RAP dapat secara signifikan meningkatkan keberlanjutan perkerasan jalan, namun optimasi proses pencampuran tetap diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif.

Kata kunci: RAP, Life Cycle Assessment, dampak lingkungan, kontribusi relatif.

1. Pendahuluan

Pembangunan jalan raya telah menggunakan sumber daya alam dalam jumlah yang besar, yang kini menimbulkan perhatian terhadap keberlanjutan dalam sektor infrastruktur jalan. Selama beberapa tahun terakhir, emisi yang dihasilkan dari konstruksi jalan meningkat secara signifikan, terutama di negara-negara berkembang yang tengah mempercepat pembangunan infrastruktur untuk mendukung pertumbuhan ekonomi [1]. Jumlah pembangunan pada infrastruktur jalan ini hampir mencakup 21 juta kilometer di seluruh dunia [2]. Selain itu, pemeliharaan dan konstruksi perkerasan jalan bertanggung jawab atas sekitar 30% konsumsi energi dan emisi karbon [3]. Sehingga salah satu tantangan utama dalam rekayasa perkerasan adalah memenuhi permintaan sumber daya lingkungan yang terus meningkat, baik dalam proses konstruksi maupun pemeliharaan, dengan tetap memastikan keberlanjutan proyek tersebut [4].

Lebih lanjut, dalam konteks pemeliharaan jalan, sejumlah besar material limbah dari campuran beraspal telah dihasilkan, namun pemanfaatannya dalam desain perkerasan jalan masih terbatas [5], dengan [6] melaporkan bahwa jutaan ton aspal terbuang sia-sia akibat penggantian perkerasan jalan yang rusak. Salah satu material campuran beraspal dengan proporsi besar yang digunakan yaitu agregat alamyang merupakan komponen utama dari campuran perkerasan jalan. Pada akhir masa pakainya, bahan limbah potensial

Diterima: hh mm yyyy
Diperbaiki: hh mm yyyy
Disetujui: hh mm yyyy

Commented [HP1]: Format Sitasi [1]

berakhir di tempat pembuangan sampah dan berkontribusi pada limbah konstruksi, yang menyumbang lebih dari 30% dari produksi limbah global [7].

Namun, material limbah ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pengganti agregat pada konstruksi perkerasan jalan baru. Material hasil milling dari proses pemeliharaan dan rehabilitasi lapisan aspal, yang dikenal sebagai Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), dapat didaur ulang dan diintegrasikan ke dalam campuran aspal baru. [8] menawarkan solusi potensial untuk meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi jalan dan mengatasi tantangan-tantangan lingkungan yang dihadapi oleh sektor ini.

Lebih jauh lagi, mengenai performa aspal dengan campuran RAP, penelitian terkini juga menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran perkerasan aspal dapat memberikan performa yang sebanding dengan Hot Mix Asphalt (HMA) konvensional, sebagaimana dilaporkan dalam beberapa studi [9–11]. Beberapa riset bahkan meneliti efek kandungan RAP pada perkerasan jalan sampai dengan prosentase 50% [12,13]. Namun, meskipun potensi RAP dari segi teknis sangat menjanjikan, penggunaannya dalam produksi aspal daur ulang memerlukan penyesuaian teknis, terutama dalam hal suhu pencampuran yang lebih tinggi dibandingkan dengan HMA biasa [14]. NCHRP menyarankan agar suhu pemanasan awal material RAP tidak melebihi 110°C, namun suhu pencampuran harus mencapai 165–175°C agar campuran daur ulang dapat dipadatkan dengan baik [14]. Peningkatan suhu ini membawa konsekuensi pada peningkatan konsumsi energi, yang pada akhirnya mempengaruhi jejak lingkungan (environmental footprint) dari proses produksi campuran aspal.

Keberlanjutan campuran aspal yang digunakan sebagai bahan perkerasan jalan dalam infrastruktur transportasi harus mempertimbangkan efisiensi dalam hal dampak lingkungan. Oleh karena itu, pengenalan penggunaan material tambahan ke dalam campuran aspal harus selalu disertai dengan penilaian siklus hidup dengan LCA. Dampak dan jejak lingkungan dari penggunaan suatu produk atau proyek pembangunan dapat dianalisa dengan metode ini. Selain itu, literatur ilmiah di bidang LCA perkerasan jalan terus berkembang. Banyak penelitian menunjukkan bahwa LCA adalah metodologi yang sangat berguna untuk mendukung pemilihan teknik perkerasan yang optimal, mencakup seluruh fase pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, renovasi, hingga pengelolaan limbah [15]. [4,16] menyebutkan bahwa penerapan LCA pada perkerasan jalan semakin meningkat, yang mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap penggunaan pendekatan siklus hidup dalam menilai beban lingkungan dari setiap tahap siklus hidup perkerasan, dari fase konstruksi hingga akhir masa pakai.

Penelitian mengenai LCA pada aspal telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari berbagai aspek konstruksi jalan. Studi yang paling menonjol dilakukan oleh [4,16] yang merangkum penerapan LCA dalam perkerasan jalan dan memberikan gambaran umum mengenai dampak lingkungan pada fase-fase siklus hidup seperti konstruksi, operasi, dan daur ulang. [15] [17] dan juga menunjukkan bahwa LCA adalah metodologi yang sangat berguna dalam mendukung pemilihan teknik perkerasan yang lebih ramah lingkungan. Namun, kebanyakan studi sebelumnya fokus pada penggunaan aspal konvensional atau pada analisis sebagian dari fase siklus hidup (misalnya hanya fase konstruksi atau penggunaan). Penelitian terkait Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) secara khusus, terutama di konteks penggunaan persentase RAP yang tinggi (hingga 50%) di Indonesia, masih terbatas. Selain itu, penelitian sebelumnya seringkali lebih menekankan pada evaluasi teknis (kinerja mekanis) daripada dampak lingkungan secara komprehensif dari RAP.

Studi ini berbeda karena menggunakan pendekatan LCA komprehensif yang tidak hanya mengevaluasi fase-fase konstruksi dan penggunaan, tetapi juga mempertimbangkan dampak dari penggunaan RAP dalam campuran aspal pada berbagai kategori lingkungan, termasuk Global Warming, Water Consumption, dan Resource Scarcity. Penelitian ini juga berfokus pada konteks Indonesia, yang belum banyak dieksplorasi dalam studi sebelumnya, memberikan perspektif baru tentang dampak penggunaan RAP di negara berkembang dengan karakteristik material dan proses konstruksi yang berbeda dari negara maju.

Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mengintegrasikan analisis LCA guna mengevaluasi penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dari penggunaan energi yang lebih tinggi dalam proses pencampurannya. LCA akan digunakan untuk menilai sejauh mana penggunaan RAP mempengaruhi keberlanjutan proyek perkerasan jalan di Indonesia, dengan fokus pada kategori dampak lingkungan seperti emisi karbon, toksisitas, serta penggunaan sumber daya.

2. Metode

Kerangka metodologi LCA ini didasarkan pada standar ISO 14040 [18], yang merekomendasikan langkah-langkah berikut: definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi hasil. Sebagai langkah awal, informasi mengenai material dan desain struktur perkerasan digunakan sebagai data masukan untuk LCA.

2.1. Definisi Ruang Lingkup

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan campuran aspal dengan RAP. Berbagai persentase RAP dalam campuran dibandingkan dengan struktur perkerasan yang disusun dengan HMA konvensional (tanpa RAP), untuk melihat bagaimana RAP berdampak pada lingkungan. Dalam studi ini, RAP tidak digunakan pada lapisan permukaan jalan karena penggunaannya pada permukaan tidak direkomendasikan. Sebaliknya, RAP diaplikasikan pada lapisan lapis antara (binder course) dan lapis pondasi atas (base course), seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Persentase RAP yang digunakan bervariasi antara 0% (Skenario referensi), 10% (Skenario 1), 20% (Skenario 2), 30% (Skenario 3), 40% (Skenario 4), dan 50% (Skenario 5). Diasumsikan bahwa densitas massa campuran dengan dan tanpa RAP tetap sama seperti yang direkomendasikan pada penelitian sebelumnya [19,20].



Gambar 1. Studi kasus penampang perkerasan jalan

Lokasi pembangunan jalan yang dianalisis adalah jalan arteri Jl. Perintis Kemerdekaan, Semarang, dengan campuran aspal yang terdiri dari aspal penetrasi 60/70 dan agregat alam. Functional Unit yang digunakan untuk mengkuantifikasi dampak lingkungan adalah 1 km panjang jalan dengan lebar jalan 3,5

Commented [HP2]: Sebaiknya gunakan bahasa indonesia, kecuali utk istilah yang dapat menimbulkan perbedaan makna

meter, menggunakan campuran HMA sesuai standar nasional Indonesia. LCA dalam penelitian ini difokuskan pada fase produksi bahan mentah (raw material), transportasi bahan mentah, mixing asphalt (pencampuran), transportasi ke site, dan konstruksi, dengan pendekatan cradle-to-lying.

2.2. Inventaris Siklus Hidup

Material Bagian ini menjelaskan sumber data input/output dari proses LCA. Basis data yang digunakan adalah Ecoinvent versi 3.8 yang dikeluarkan pada tahun 2020 diproses menggunakan perangkat lunak SimaPro 9.3.3.

Pada fase bahan mentah, aspal cair dimodelkan menggunakan dataset Ecoinvent "Bitumen adhesive compound hot (RoW) production | Cut-off U", sementara agregat alam dimodelkan menggunakan dataset "Gravel crushed (RoW) production | Cut-off U". Pemodelan ini dilakukan untuk memastikan akurasi dalam perhitungan dampak lingkungan yang terkait dengan material dasar yang digunakan dalam campuran aspal.

Pada fase transportasi Bahan Baku ke Pencampuran aspal Plant (AMP): Jarak transportasi bahan mentah ke AMP diperoleh melalui wawancara dengan manajer proyek di lokasi studi kasus. Semua fase transportasi bahan baku dimodelkan menggunakan dataset dari Ecoinvent v3, yaitu "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return". Unit yang digunakan adalah ton-kilometer (tkm), yang dihitung dengan mengalikan berat material dengan jarak transportasi ke AMP. **Tabel 1** menyajikan ringkasan jarak dan ukuran angkutan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Jarak dan besaran ukuran angkutan barang pada fase transportasi bahan mentah

Lapis Antara							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Skenario Referensi	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
Aspal	35	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74	1090.74
Aggregat	10	5568.36	4980.36	4392.36	3804.36	3216.36	2628.36
RAP	15	0	882	1764	2646	3528	4410

Lapis pondasi atas							
Material	Distance (km)	Besaran ukuran angkutan barang					
		Scenario referensi	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Aspal	35	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25	1727.25
Aggregat	10	12337.5	11103.75	9870	8636.25	7402.5	6168.75
RAP	15	0	1850.625	3701.25	5551.875	7402.5	9253.125

Commented [HP3]: indonesia

Pada fase pembuatan campuran aspal, proses pencampuran aspal dilakukan menggunakan pabrik pencampuran batch dengan kapasitas 160 ton/jam, yang membutuhkan daya termal sebesar 12.000 kWh [21]. Setiap ton campuran aspal mengonsumsi energi sebesar 75 kWh. Untuk campuran HMA yang mengandung RAP, suhu pencampuran lebih tinggi diperlukan untuk memastikan campuran dapat dipadatkan dengan baik, karena aspal pada RAP cenderung lebih kaku dibandingkan aspal baru. Penambahan RAP menyebabkan peningkatan konsumsi energi sebesar 5% untuk campuran dengan 20-40% RAP, dan 10% untuk campuran dengan 50% RAP. Untuk pemodelan energi ini, digunakan dataset "District heat, light fuel oil, at industrial furnace" dari Ecoinvent. Pada fase transportasi ke lokasi konstruksi, jarak transportasi dari AMP ke lokasi konstruksi diasumsikan sama untuk semua campuran

Commented [HP4]: sitasi? cek format

aspal, yaitu 16 km. Transportasi ini dimodelkan dengan dataset "Truck 10-20t EURO4 80% LF and empty return" untuk memodelkan emisi transportasi. Pada tahap konstruksi, berbagai jenis alat berat digunakan untuk operasi pengaspalan, pemadatan, dan penggilingan. Produktivitas dan daya mesin untuk setiap jenis alat berat ditampilkan di **Tabel 2**. Emisi yang dihasilkan dihitung berdasarkan tingkat utilitas alat berat, yang dikalikan dengan daya mesin untuk menghitung konsumsi energi. Emisi gas rumah kaca (GWP) dihitung menggunakan dataset global "Diesel burned in building machine (GLO)" dari Ecoinvent.

Tabel 2. Data alat pada fase konstruksi

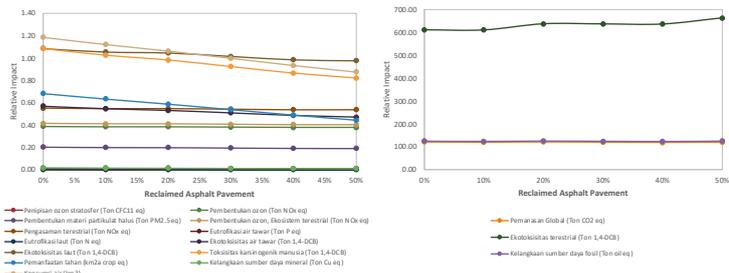
Mesin	Model	Produktivitas	Tenaga mesin (kW)
Mesin Pengaspal	BOMAG BF 600 P-3	1,530 m ² /jam	129
Roller Tandem	DYNAPAC CC2200	800 m ² /jam	75
Roller Pneumatik	DYNAPAC CP275	2,300 m ² /jam	93

2.3. Kategori dampak yang dievaluasi

Pemodelan karakterisasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dilakukan dengan menerapkan metode penilaian dampak ReCiPe Midpoint, menurut perspektif hierarki [22]. Secara khusus, kategori dampak berikut dipertimbangkan: Pemanasan global, Penipisan ozon stratosfer, Radiasi pengion, Pembentukan ozon, Pembentukan partikel halus, Pembentukan ozon, Ekosistem terestrial, Pengasaman terestrial, Eutrofikasi air tawar, Eutrofikasi laut, Ekotoksistas terestrial, Ekotoksistas air tawar, Ekotoksistas laut, Toksistas karsinogenik manusia, Toksistas non-karsinogenik manusia, Penggunaan lahan, Kelangkaan sumber daya mineral, Kelangkaan sumber daya fosil, Konsumsi air. Dalam analisis ini, perangkat lunak Simapro 9.0 yang dikembangkan oleh Pre Sustainability, Belanda, digunakan untuk memodelkan sistem atau proses guna mengevaluasi efek penambahan RAP pada dampak environmental [23] Simapro adalah perangkat lunak komersial yang digunakan untuk pemodelan, penghitungan, dan visualisasi material serta sistem aliran energi. Alat ini digunakan untuk menganalisis aliran proses di seluruh siklus hidup suatu produk.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Penelitian ini mengkaji dampak lingkungan dari penggunaan RAP dalam campuran aspal dengan berbagai persentase (0% hingga 50%). Melalui analisis menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), diperoleh data yang mencakup 18 kategori dampak lingkungan yang diukur berdasarkan metode Recipe Midpoint H. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan RAP memberikan pengaruh positif terhadap penurunan dampak lingkungan pada sebagian besar kategori (**Gambar 2**).



Gambar 2. Dampak lingkungan pada tiap kenaikan presentase RAP

Sebagaimana juga ditunjukkan pada Tabel 3, kategori dampak seperti Kelangkaan sumber daya mineral, Penggunaan lahan, Konsumsi air, Toksisitas karsinogenik manusia, Eutrofikasi air tawar, Ekotoksitas air tawar, dan Eutrofikasi laut mengalami penurunan yang signifikan pada skenario penggunaan 50% RAP. Penurunan terbesar terjadi pada kategori Kelangkaan sumber daya mineral, dengan penurunan sebesar 37,1%. Penurunan dampak lingkungan pada kategori lain juga signifikan, yakni sebesar 35,2% untuk Penggunaan lahan, 26,2% untuk Konsumsi air, serta penurunan lebih lanjut pada Toksisitas karsinogenik manusia (24,4%), Eutrofikasi air tawar (23,4%), dan Ekotoksitas air tawar (17,1%). Kategori lain seperti Radiasi pengion, Toksisitas non-karsinogenik pada manusia, Ekotoksitas laut, dan Pembentukan materi partikulat halus menunjukkan penurunan yang lebih moderat. Pada skenario 50% RAP, masing-masing kategori ini mengalami penurunan sebesar 11,8%, 11,5%, 10,1%, dan 6,1%. Meskipun penurunan ini tidak sebesar kategori sebelumnya, hasil tersebut tetap menunjukkan adanya kontribusi positif terhadap pengurangan dampak lingkungan dari penggunaan RAP. Sebaliknya, kategori Pemanasan global dan kelangkaan sumber daya fosil menunjukkan pola yang lebih fluktuatif dan tidak konsisten seiring dengan peningkatan persentase RAP. Di sisi lain, kategori Ekotoksitas terestrial justru mengalami peningkatan dampak seiring dengan bertambahnya RAP, yang memerlukan analisis lebih lanjut mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi hasil tersebut.

Commented [HP5]: sebaiknya menggunakan bahasa indonesia RAP, sebaiknya ditulis lengkap untuk Sb X

Tabel 3. Nilai dampak lingkungan pada skenario penelitian

Impact category	Unit	Skenario Referensi	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
Pemanasan Global	Ton CO2 eq	121.09	119.75	121.16	119.82	118.48	119.88
Penipisan ozon stratosfer	Ton CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Radiasi pengion	1000 kBq Co-60 eq	5.59	5.43	5.34	5.18	5.02	4.93
Pembentukan ozon	Ton NOx eq	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Pembentukan materi partikulat halus	Ton PM2.5 eq	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19
Pembentukan ozon, Ekosistem terestrial	Ton NOx eq	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40
Pengasaman terestrial	Ton SO2 eq	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54
Eutrofikasi air tawar	Ton P eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Eutrofikasi laut	Ton N eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

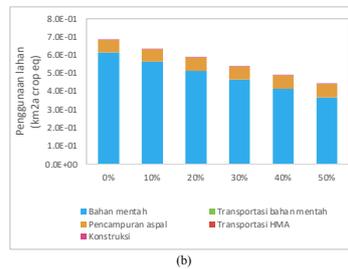
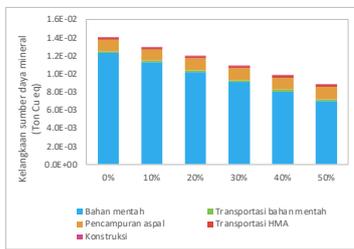
Commented [HP6]: indonesia

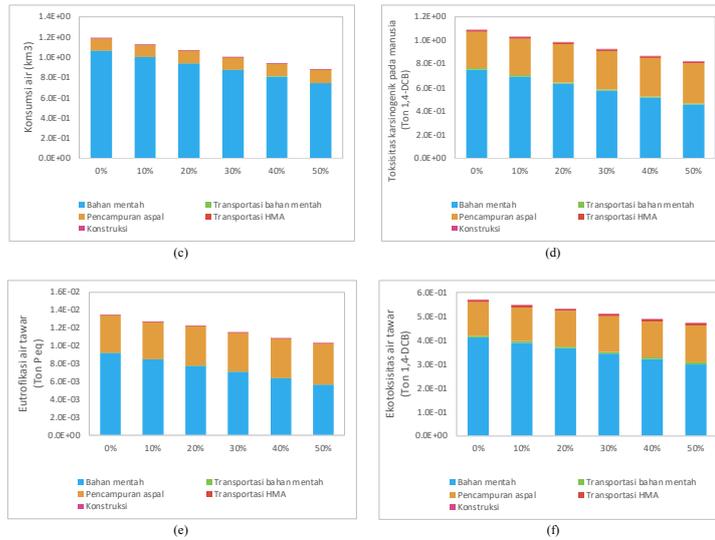
Commented [HP7]: indonesia

Ekotoksistas terestrial (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	611.55	611.08	637.60	637.13	636.66	663.17
Ekotoksistas air tawar (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47
Ekotoksistas laut (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.05	1.05	1.01	0.98	0.98
Toksistas karsinogenik manusia (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.03	0.98	0.92	0.86	0.82
Toksistas non-karsinogenik manusia (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	20.77	20.15	19.89	19.26	18.64	18.38
Pemanfaatan lahan (km ² a crop eq)	km ² a crop eq	0.68	0.63	0.59	0.54	0.49	0.44
Kelangkaan sumber daya mineral (Ton Cu eq)	Ton Cu eq	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Kelangkaan sumber daya fosil (Ton oil eq)	Ton oil eq	124.76	124.43	124.98	124.64	124.30	124.85
Konsumsi air (km ³)	km ³	1.19	1.12	1.06	1.00	0.93	0.88

Dari 18 kategori dampak yang dianalisis, penurunan dampak lingkungan yang signifikan pada enam kategori utama (Kelangkaan sumber daya mineral, Penggunaan lahan, Konsumsi air, Toksistas karsinogenik manusia, Eutrofikasi air tawar, dan Ekotoksistas air tawar) terutama disebabkan oleh pengurangan penggunaan bahan baku baru melalui substitusi RAP. Pengurangan penggunaan agregat alam dengan RAP secara signifikan mengurangi dampak lingkungan pada kategori Kelangkaan sumber daya mineral, Penggunaan lahan, dan Konsumsi air (**Gambar 3.a-c**).

Namun demikian, fase pencampuran aspal (asphalt mixing) dengan RAP menunjukkan adanya sedikit peningkatan dampak pada beberapa kategori. Sebagai contoh, pada kategori Ekotoksistas air tawar, Toksistas karsinogenik manusia, dan Ekotoksistas laut (**Gambar 3.d-f**), fase pencampuran memiliki kontribusi yang lebih besar dibandingkan fase lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun substitusi agregat alam dengan RAP menurunkan dampak lingkungan secara keseluruhan, peningkatan konsumsi energi dan emisi dari proses Pencampuran aspal tetap harus diperhitungkan.

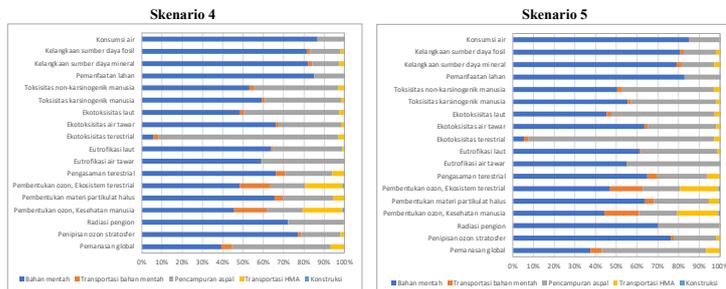




Gambar 3. Nilai dampak lingkungan pada impact category: a) Kelangkaan sumber daya mineral, b) Pemanfaatan lahan, c) Konsumsi air, d) Toksisitas karsinogenik pada manusia, e) Eutrofikasi air tawar, dan f) Ekotoksistas air tawar

Penelitian ini juga mengidentifikasi kontribusi masing-masing fase dalam siklus hidup perkerasan terhadap dampak lingkungan untuk setiap skenario. Pada skenario referensi, yaitu campuran beraspal tanpa kandungan RAP, fase produksi bahan mentah mendominasi kontribusi terhadap dampak lingkungan pada hampir semua impact category, dengan kontribusi berkisar antara 50-90%. Secara spesifik, kontribusi terbesar dari bahan mentah muncul pada kategori pemanasan global (44%), radiasi pengion (76%), dan penggunaan lahan (90%), karena semua bahan yang digunakan adalah bahan baru. Namun, pada kategori Pemanasan Global dan Ekotoksistas Terrestrial, fase Pencampuran aspal menjadi penyumbang dampak terbesar, masing-masing sebesar 45% dan 88%, serta membantu 23% pada kategori pembentukan partikel halus. Fase transportasi HMA memiliki kontribusi kecil, sekitar 6%, untuk beberapa kategori.

Pada skenario 1 dan 2, dengan penambahan 10% dan 20% RAP, fase produksi bahan mentah masih mendominasi kontribusi pada sebagian besar impact category, meskipun kontribusi ini menurun menjadi 49-89%, terutama pada kategori pemanasan global yang turun menjadi 43%, dan penggunaan lahan yang turun menjadi 89%. Penurunan ini disebabkan oleh pengurangan penggunaan agregat alami yang sebagian digantikan oleh RAP. Pencampuran aspal tetap menyumbang kontribusi besar (45%),



Gambar 4. Kontribusi relatif fase siklus hidup pada tiap skenario penambahan RAP

Commented [HP8]: bahasa

Keseluruhan hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP pada campuran aspal memberikan dampak positif terhadap lingkungan, terutama dalam hal penghematan sumber daya alam (bahan mentah). Namun, pada saat yang sama, proses pencampuran aspal untuk campuran yang mengandung RAP akan meningkatkan dampak lingkungan yang disebabkan oleh kenaikan suhu pencampuran. Sehingga peningkatan dampak pada fase pencampuran menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut dalam proses produksi campuran aspal dengan RAP.

4. Kesimpulan

Kesimpulan Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran aspal dapat secara signifikan mengurangi dampak lingkungan, terutama dalam kategori yang terkait dengan penggunaan sumber daya alam. Penggunaan RAP hingga 50% dalam campuran aspal mengurangi Kelangkaan Sumber Daya Mineral sebesar 37,1%, Penggunaan Lahan sebesar 35,2%, dan Konsumsi Air sebesar 26,2%. Kontribusi relatif terbesar terhadap pengurangan dampak berasal dari penurunan penggunaan bahan baku baru, yang sangat berpengaruh pada kategori Kelangkaan Sumber Daya Mineral dan Penggunaan Lahan. Namun, peningkatan RAP juga menyebabkan peningkatan pada Ekotoksitas Terestrial, yang berhubungan dengan fase pencampuran aspal. Fase ini memerlukan lebih banyak energi karena suhu pencampuran yang lebih tinggi, yang berkontribusi terhadap peningkatan dampak toksisitas. Oleh karena itu, optimasi pada proses pencampuran perlu dilakukan untuk mengurangi dampak negatif tersebut. Meskipun demikian, hasil penelitian ini mendukung penggunaan RAP sebagai solusi berkelanjutan untuk pembangunan infrastruktur jalan, dengan pengurangan dampak lingkungan yang signifikan, terutama pada fase material.

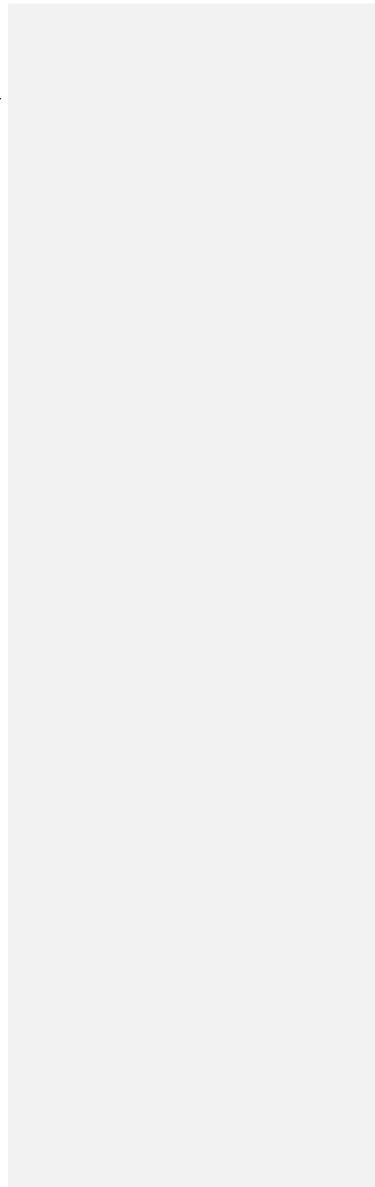
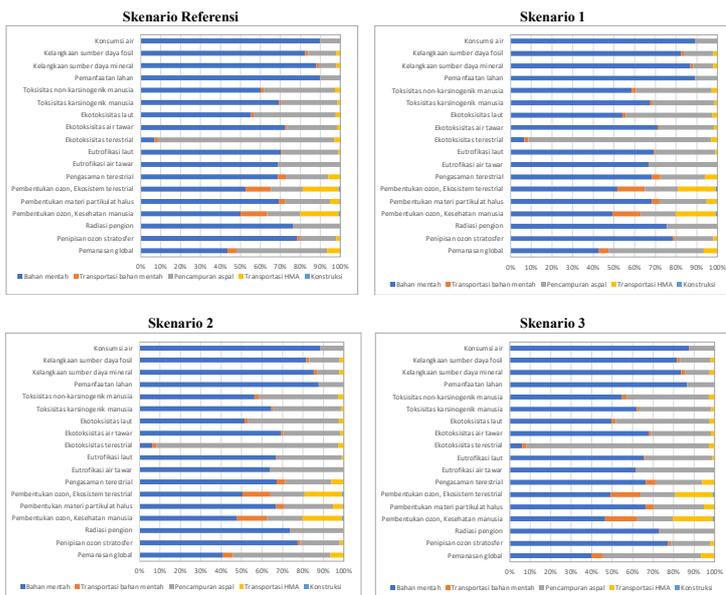
Penelitian ini berkontribusi pada pemahaman tentang dampak penggunaan RAP dan memberikan dasar untuk pengembangan kebijakan yang mendukung penerapan material daur ulang dalam infrastruktur jalan di Indonesia.

Daftar Pustaka

[1] World Bank. Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation, A Toolkit for Developing Countries; ROADTO Toolkit User Manual User Manual. A World Bank Rep. 2011;
 [2] Costa JO, Borges PHR, dos Santos FA, Bezerra ACS, Van den bergh W, Blom J. Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs. Constr Build Mater. 2020;265:120325. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120325

Commented [HP9]: format referensi belum sesuai

sedangkan fase transportasi tetap stabil tanpa perubahan signifikan. Pada skenario 2 dan 3, dengan penambahan RAP sebesar 20-30%, kontribusi fase bahan mentah terus menurun, dengan global warming turun menjadi 41-40% dan land use menjadi 88-87%. Namun, fase Pencampuran aspal tetap dominan dengan kontribusi 48% terhadap global warming, dan sedikit peningkatan kontribusi terjadi pada fase transportasi karena lebih banyak RAP yang diangkut. Peningkatan kebutuhan suhu pencampuran aspal sebesar 5% juga menyebabkan peningkatan konsumsi energi pada fase ini. Pada skenario 4, dengan 40% RAP, kontribusi fase bahan mentah dan Pencampuran aspal mulai berimbang pada sebagian besar impact category. Bahan mentah menyumbang 39% pada pemanasan global dan 85% pada penggunaan lahan, sedangkan fase pencampuran aspal meningkat kontribusinya menjadi 49%. Peningkatan suhu pencampuran sebesar 10% turut mempengaruhi peningkatan dampak dari fase ini. Transportasi tetap memberikan kontribusi stabil di sekitar 6-7%. Pada skenario 5, dengan 50% RAP, fase Pencampuran aspal menjadi penyumbang terbesar pada sebagian besar impact category. Kontribusinya mencapai 50% untuk pemanasan global dan eutrofikasi air tawar, serta 50% untuk ekotoksistas laut, sementara fase ekotoksistas terestrial mendominasi hingga 90%. Penggunaan bahan mentah terus menurun, dengan kontribusi terhadap pemanasan global turun menjadi 37% dan penggunaan lahan menjadi 83%, sedangkan fase transportasi tetap stabil di sekitar 6-7%.



6. Bukti konfirmasi artikel accepted

03/02/2025, 12:30

Diponegoro University Mail - [Jsil] Editor Decision



fardzanela fardzanela <fardzanela@live.undip.ac.id>

[Jsil] Editor Decision

1 message

Ms Joana Febrita <jurnal@apps.ipb.ac.id>

Wed, Oct 23, 2024 at 10:08 AM

To: Fardzanela Suwanto <fardzanela@live.undip.ac.id>, Tri Sudibyو <tri.sudibyو@apps.ipb.ac.id>

Fardzanela Suwanto, Tri Sudibyو:

We have reached a decision regarding your submission to Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, "Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment".

Our decision is to: Accepted

Ms Joana Febrita
SIL IPB
joanafebrita@apps.ipb.ac.id

Editor Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil> email: jsil_ipb@apps.ipb.ac.id

2 attachments

 **C-LOA 0035-Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment-sig.pdf**
163K

 **C-59516-Article Text-304489-1-18-20241018.docx**
739K

Number : 0035/J-SIL/X/2024
Subject : Accepted Paper

Bogor, October 23th, 2024

To:
Fardzanela Suwarto, Tri Sudibyo

Thank you for revising the manuscript: **ANALISIS SIKLUS HIDUP PADA CAMPURAN ASPAL DENGAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT DENGAN METODE LIFE CYCLE ASESMENT**. We have carefully checked the revised version and we are pleased to inform you that your manuscript is **ACCEPTED** for publication in J-SIL. The manuscript is being handled for further process and is scheduled for publication in **Vol. 9 No. 02 : Oktober 2024**.

We are proud to share with you that J-SIL is accredited as SINTA 4.

Please visit <https://jurnal.ipb.ac.id/index.php/jsil> to access the progress of your manuscript.

The APC (Article Processing Charge) fee is IDR 500,000. This fee should be paid through a Bank Syariah Indonesia account, No 7267929704 a/n Jurnal SIL IPB no later than 1 week. If you have made a payment, please fill in the link <https://ipb.link/jsil-payment>

Thank you for considering J-SIL as venue of your publication.

Chief Editor J-SIL,



Dr. Chusnul Arif, S.TP, M.Si.,IPM.
NIP. 198012062005011004

7. Bukti artikel published online

Home / Archives / Vol. 9 No. 2: Oktober 2024 / Research Articles

Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment

Fardzanela Suwarto
Universitas Diponegoro

Tri Sudibyo
Universitas IPB

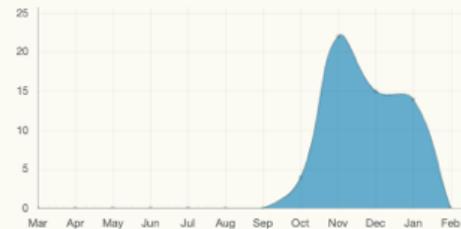
DOI: <https://doi.org/10.29244/jsil.9.2.315-326>

Keywords: RAP, Life Cycle Assessment, dampak lingkungan, kontribusi relatif

Abstract

Penelitian ini mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal dengan metode Life Cycle Assessment (LCA). Variasi RAP mulai dari 0% hingga 50% dianalisis terhadap 18 kategori dampak, termasuk Global Warming, Water Consumption, dan Resource Scarcity. Hasil menunjukkan bahwa RAP mengurangi Mineral Resource Scarcity hingga 37,1%, Land Use 35,2%, dan Water Consumption sebesar 26,2%, dengan kontribusi terbesar berasal dari pengurangan penggunaan material baru. Namun, RAP meningkatkan dampak pada Terrestrial Ecotoxicity akibat konsumsi energi yang lebih tinggi pada fase pencampuran. Penelitian ini mendukung penggunaan RAP untuk meningkatkan keberlanjutan infrastruktur jalan dengan optimasi proses pencampuran untuk meminimalkan dampak negatif.

Downloads



References

- World Bank. Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation, A Toolkit for Developing Countries; ROADCO Toolkit User Manual User Manual. A World Bank Rep. 2011;
- Santero NJ, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. Resour Conserv Recycl [Internet]. 2011;55(9-10):810-8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>
- Zhao Z, Xiao F, Amirkhanian S. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. Waste Manag [Internet]. 2020;108:78-105. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>
- Dong Q, Huang B. Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material. J Mater Civ Eng. 2014;26(2):379-83.
- Audrey Copeland. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Rep No FHWA-HRT-11-021. 2011; (FHWA):McLean, Virginia.
- Zaumanis M, Mallick RB. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. Int J Pavement Eng [Internet]. 2015;16(1):39-55. Available from: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
- Lo Presti D, Jiménez Del Barco Carrión A, Airey G, Hajj E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. J Clean Prod [Internet]. 2016;131:43-51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093>
- Porot L, Di Nolfo M, Polastro E, Tulcinsky S. Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent. In: Porot, Laurent, et al "Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent" Proceedings of the 6th Eurasphalt Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic; 2017. p. 1-8.
- D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, Baumgardner G, Corrigan M, Cowsert J, et al. Warm-Mix asphalt: European Practice. Fed Highw



PDF

Published
2024-10-28

How to Cite

Suwarto F, Sudibyo T. Analisis Siklus Hidup pada Campuran Aspal dengan Reclaimed Asphalt Pavement Dengan Metode Life Cycle Assessment. J-Sil [Internet]. 2024Oct.28 [cited 2025Feb.3];9(2):315-26. Available from: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jsil/articla/view/59516>

More Citation Formats

Issue

Vol. 9 No. 2: Oktober 2024

Section

Research Articles

Copyright (c) 2024 Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

Authors who publish with Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan,

JSIL agree to the following terms:
a. Authors retain copyright and grant the journal right of first publication with the work simultaneously licensed under a Creative Commons Attribution License that allows others to share the work with an acknowledgment of the work's authorship and initial publication in this journal.

b. Authors are able to enter into separate, additional contractual arrangements for the non-exclusive distribution of the journal's published version of the work (e.g., post it to an institutional repository or publish it in a book), with an acknowledgment of its initial publication in this journal.

c. Authors are permitted and encouraged to post their work online



E-ISSN: 2549-1407



Make a Submission

FOCUS AND SCOPE

PUBLICATION ETHICS

AUTHOR GUIDELINES

PRIVACY STATEMENT

COPYRIGHT NOTICE

MITRA BESTARI

JSIL has been indexed by the following databases:

