

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

Fardzanela Suwarta¹ dan Tri Sudibyo²

¹Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia 50275

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Bogor, Indonesia 16680

*penulis koresponden: fardzanela@live.undip.ac.id

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

Diterima: 4 Oktober 2024
Diperbaiki: 19 Oktober 2024
Disetujui: 23 Oktober 2024

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 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 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

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 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

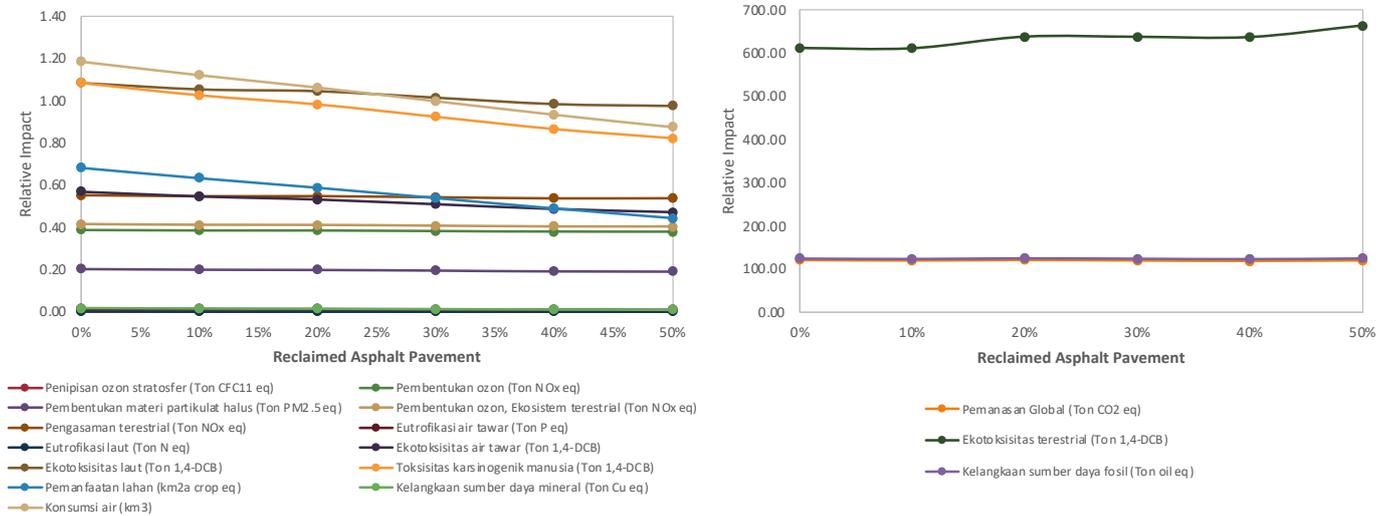
Pemodelan karakterisasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dilakukan dengan menerapkan metode penilaian dampak ReCiPe Midpoint, menurut perspektif hierarki [22]. Secara khusus, kategori dampak berikut dipertimbangkan: Pemanasan global, Penipisan ozon stratosfer, Radiasi pengion, Pembentukan ozon, Pembentukan partikel halus, Pembentukan ozon, Ekosistem terestrial, Pengasaman terestrial, Eutrofikasi air tawar, Eutrofikasi laut, Ekotoksitas terestrial, Ekotoksitas air tawar, Ekotoksitas laut, Toksisitas karsinogenik manusia, Toksisitas 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**).

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 Ekotoksikisitas terestrial justru mengalami peningkatan dampak seiring dengan bertambahnya RAP, yang memerlukan analisis lebih lanjut mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi hasil tersebut.



Gambar 2. Dampak lingkungan pada tiap kenaikan presentase RAP

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
Ekotoksikisitas terestrial (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	611.55	611.08	637.60	637.13	636.66	663.17
Ekotoksikisitas air tawar (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47
Ekotoksikisitas laut (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.05	1.05	1.01	0.98	0.98
Toksikisitas karsinogenik manusia (Ton 1,4-DCB)	Ton 1,4-DCB	1.09	1.03	0.98	0.92	0.86	0.82
Toksikisitas 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 (km2a crop eq)	km2a 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 (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 (Kelangkaan sumber daya mineral, Penggunaan lahan, Konsumsi air, Toksisitas karsinogenik manusia, Eutrofikasi air tawar, dan Ekotoksisitas 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**).

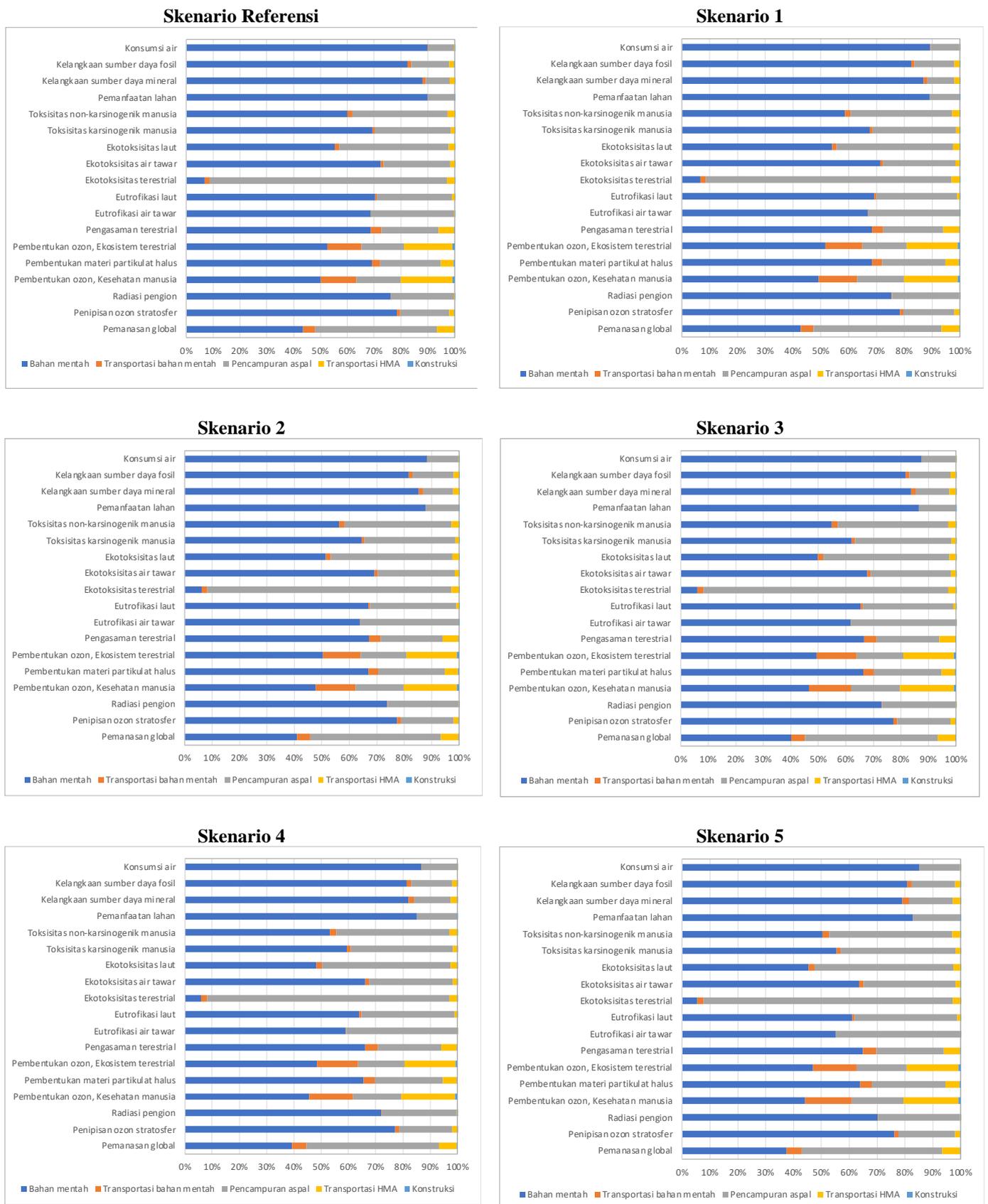
Namun demikian, fase pencampuran aspal (asphalt mixing) dengan RAP menunjukkan adanya sedikit peningkatan dampak pada beberapa kategori. Sebagai contoh, pada kategori Ekotoksisitas air tawar, Toksisitas karsinogenik manusia, dan Ekotoksisitas laut (**Gambar 3.d-f**), fase pencampuran memiliki kontribusi 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.

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 Ekotoksisitas 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%), 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 ekotoksisitas laut, sementara fase ekotoksisitas terrestrial 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%.



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



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 (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 Terrestrial, 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; ROADEO 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
- [3] Choi J ho. Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement. *J Clean Prod*. 2019;209:88–100. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.226
- [4] Santero NJ, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resour Conserv Recycl*. 2011;55(9–10):810–8. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.009
- [5] Zhao Z, Xiao F, Amir Khanian S. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste Manag*. 2020;108:78–105. doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.024
- [6] 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.
- [7] Purchase CK, Al Zulayq, Dhafer Manna. Circular economy of construction and demolition waste: A literature review on lessons, challenges and benefits, O'brien BT, Kowalewski MJ, Berenjian A, Tarighaleslami AH, et al. As a result of misuse and poor management, recycled building materials can help reduce the shortage of natural resources while also fostering sustainability and improving the economy, society, and environment. *Materials (Basel)*. 2022;15(1):1–25.
- [8] Audrey Copeland. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Rep No FHWA-HRT-11-021. 2011;(FHWA):McLean, Virginia.
- [9] Zaumanis M, Mallick RB. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *Int J Pavement Eng*. 2015;16(1):39–55. doi: 10.1080/10298436.2014.893331

- [10] 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.* 2016;131:43–51. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.093
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Vaitkus A, Vorobjovas V, Žalimienė L, Žiliūt 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. Riga, Latvia; 2009.
- [14] 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.* 2000;30(October):1–280.
- [15] Gulotta TM, Mistretta M, Praticò FG. A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. *Sci Total Environ.* 2019;673:585–93.
- [16] Santero NJ, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resour Conserv Recycl.* 2011;55(9–10):801–9. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.010
- [17] Suwanto F, Parry T, Airey G. Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Mater Pavement Des.* 2024;25(8):1631–57. doi: 10.1080/14680629.2023.2278149
- [18] ISO. Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines. Vol. 14044. ISO; 2006.
- [19] Mukherjee A. Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration. *Natl Asphlat Pavement Assoc.* 2016;(September).
- [20] Kaseer F, Arámbula-Mercado E, Martin AE. A method to quantify reclaimed asphalt pavement binder availability (effective RAP binder) in recycled asphalt mixes. *Transp Res Rec.* 2019;2673(1):205–16.
- [21] Santos MB dos, Candido J, Baulé SDS, Oliveira YMM de, Thives LP. Greenhouse gas emissions and energy consumption in asphalt plants. *Rev Eletrônica em Gestão, Educ e Tecnol Ambient.* 2020;24:7.
- [22] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, Schryver A De, Struijs J, Zelm R Van. *ReCiPe* 2008. Potentials. 2009;(January):1–44.
- [23] Pré. Product Ecology Consultants SimaPro 9 software. Amersfoort, The Netherlands; 2010.

