

ANALISIS KONSUMSI ENERGI DAN EMISI GAS RUMAH KACA PADA PEKERJAAN KONSTRUKSI JALAN DENGAN PERKERASAN LENTUR DAN PERKERASAN KAKU

LENDRA¹, APRIA BRITA PANDOHOP GAWEI¹, LELO SINTANI²

1. Program Studi/Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Palangka Raya

2. Program Studi/Jurusan Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Palangka Raya

Email: lendraleman@jts.upr.ac.id

ABSTRAK

Pekerjaan konstruksi jalan dari tahap konstruksi hingga tahap operasi, mengkonsumsi energi dalam jumlah besar dan menghasilkan emisi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besarnya energi dan emisi gas rumah kaca (CO₂) pada pekerjaan jalan dengan perkerasan lentur (aspal) dan perkerasan kaku (beton) dengan menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA). Studi kasus dilakukan pada ruas jalan di Provinsi Kalimantan Tengah. Metode yang digunakan untuk memperkirakan konsumsi energi dan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) adalah metode Tabel Penggunaan Energi dan Emisi GRK untuk Konstruksi Perkerasan dan Metode Konversi Bahan Bakar yang mengacu pada prosedur standar Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Hasil perhitungan pada tahap produksi dan konstruksi, konsumsi energi untuk konstruksi perkerasan kaku sebesar 612.16 GJ, dan perkerasan lentur sebesar 268.91 GJ. Hasil perhitungan emisi total menunjukkan bahwa perkerasan lentur sebesar 19949.38 kgCO₂/km, dan perkerasan kaku sebesar 45414.75 kgCO₂/km. Studi ini menyimpulkan bahwa perkerasan lentur lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan daripada perkerasan kaku.

Kata kunci: sustainable, jalan, energi, emisi.

ABSTRACT

Road construction work from the construction stage to the operation stage, consume a large amount of energy and produce emissions. This study aims to analyze the amount of energy and greenhouse gas (CO₂) emissions from road works with flexible pavement (asphalt) and rigid pavement (concrete) using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. The case study was conducted on roads in Central Kalimantan Province. The method used to estimate energy consumption and Greenhouse Gas (GHG) emissions is the Energy Use and GHG Emissions for Pavement Construction Table method and the Fuel Conversion Method, which refers to the standard procedure of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The results of calculations at the production and construction stages, the energy consumption for rigid pavement construction is 612.16 GJ, and flexible pavement is 268.91 GJ. The result of the total emission calculation shows that flexible pavement is 19949.38 kgCO₂/km, and rigid pavement is 45414.75 kgCO₂/km. This study concludes that flexible pavements are more environmentally friendly and sustainable than rigid pavements.

Keywords: sustainable, road, energy, emissions.

1. PENDAHULUAN

Lingkungan dan pemanasan global sudah menjadi isu yang begitu menggema di dunia termasuk juga di Indonesia. Perkembangan konstruksi dianggap mempunyai peranan yang cukup besar dalam perubahan lingkungan yang terjadi di permukaan bumi. Dimulai dari tahap konstruksi hingga operasional, kegiatan konstruksi tidak bisa lepas dari pemanfaatan sumber daya alam yang semakin terbatas jumlahnya, belum lagi dampak yang timbul dari penggunaan fasilitas bangunan serta pemilihan material bangunan yang terkait dengan peningkatan suhu di bumi. Proses konstruksi bangunan sipil yang banyak menggunakan sumber daya alam, sangat dimungkinkan turut andil dalam menciptakan kerusakan alam tersebut. Jalan merupakan aset bagi masyarakat dan merupakan komponen penting dalam pembangunan infrastruktur suatu negara. Jalan merupakan salah satu prasarana transportasi yang berperan dalam kehidupan bangsa Indonesia dan memajukan kesejahteraan umum (Isya dkk, 2019). Pekerjaan konstruksi dan pemeliharaan jalan yang teratur membutuhkan bahan-bahan yang diproduksi melalui proses yang sangat intensif karbon dan membutuhkan energi (Santos dkk, 2015). Pekerjaan konstruksi jalan sangat bergantung pada bahan bangunan seperti tanah, batu, kapur, semen dan aspal. Sejumlah besar studi telah menunjukkan bahwa proses konstruksi perkerasan aspal tradisional akan menghasilkan sejumlah besar konsumsi energi dan emisi karbon, yang tidak kondusif bagi perlindungan lingkungan dan pengembangan berkelanjutan dari lokasi konstruksi (Zheng dkk, 2019). Penggunaan material dan sumber daya alam tidak terbarukan dapat menjadi permasalahan bagi generasi mendatang. Program pembangunan yang memperhatikan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan telah dicanangkan oleh banyak negara dan telah menjadi kesepakatan bersama sebagai pembangunan berkelanjutan. Adapun tujuan khusus yang mengarah pada pembangunan jalan berkelanjutan di Indonesia adalah dengan mempertimbangkan prinsip-prinsip pembangunan jalan berkelanjutan yang telah digunakan oleh negara-negara lain (Lawalata, 2013). Adapun urgensi mengapa penelitian ini perlu dilakukan karena pembangunan jalan memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan, ekonomi dan masyarakat, dan pemilihan jenis perkerasan dengan demikian memiliki implikasi yang luas. Semua fase pengembangan jalan, dari konstruksi ke operasi, mengkonsumsi sejumlah besar barang dan jasa ekosistem, dan menghasilkan limbah dan emisi (Kucukvar dan Tatari, 2012). Dengan perbedaan bahan material dan jumlah energi yang dibutuhkan, sudah tentu dampak lingkungan yang disumbangkan oleh kedua jenis perkerasan ini akan berbeda pula, terutama emisi CO₂ yang merupakan gas penyebab pemanasan global (Meijer dkk, 2018).

Sejumlah besar energi dan emisi berbentuk partikulat dihasilkan selama fase konstruksi perkerasan jalan. Jalan di bangun dalam beberapa lapisan, terdiri dari lapisan tanah dasar, lapisan bawah tanah, lapisan dasar dan permukaan. Lapisan-lapisan ini bersama-sama membentuk perkerasan. Perkerasan dapat dibuat dari berbagai bahan dan campuran bahan yang terdiri dari kerikil, batu, aspal, beton atau tanah yang lebih baik. Jenis bahan dan ketebalan lapisan perkerasan ditentukan sesuai dengan kepadatan lalu lintas yang diharapkan. Ada tiga jenis perkerasan, yaitu: perkerasan aspal, perkerasan beton dan perkerasan komposit (lapisan aspal dan beton dalam perkerasan yang sama) (Thives dan Ghisi, 2017). Sistem pembangunan berkelanjutan (*sustainable construction*) merupakan suatu topik hangat di dunia konstruksi internasional sebagai respon atas issue pemanasan global (*global warming*). Perencana, konsultan maupun kontraktor diharapkan dapat mengambil bagian dalam kelestarian lingkungan sekitarnya dengan menerapkan suatu sistem yang ramah lingkungan untuk bisa mereduksi emisi yang menyebabkan pemanasan global yaitu CO₂. Dengan semakin meningkatnya perhatian terhadap pembangunan berkelanjutan, aspek lingkungan dan dampak potensial dari calon proyek semakin

ditekankan dalam studi kelayakan. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) telah menjadi kriteria lingkungan yang penting sejak Protokol Kyoto tahun 1997 memulai upaya internasional yang lebih terpadu untuk membatasi emisi GRK. Sebagai salah satu sektor emisi GRK terbesar, industri konstruksi telah mulai memasukkan penilaian emisi GRK untuk menentukan kelayakan atau prioritas proyek untuk pembangunan berkelanjutan. Namun, sebagian besar upaya telah difokuskan pada evaluasi emisi GRK dari bangunan. Perhatian relatif sedikit telah diberikan untuk memperkirakan emisi GRK dari struktur teknik sipil, seperti perkerasan. Alasan yang mungkin adalah kurangnya informasi yang relevan pada tahap awal proyek teknik sipil (Kim dkk, 2012). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jumlah energi dan emisi gas rumah kaca (CO₂) pada pekerjaan jalan dengan perkerasan aspal dan perkerasan beton dengan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) mengambil studi kasus pada ruas jalan di Provinsi Kalimantan Tengah pada Kabupaten Kotawaringin Barat dan Kabupaten Lamandau. Bagian jalan yang dianalisis pada kedua jenis jalan ini adalah pada bagian lapisan perkerasannya, yaitu lapisan perkerasan *Aspal Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dan *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC) untuk perkerasan lentur dan plat beton bertulang (*reinforced concrete slab*) untuk perkerasan kaku.

Melalui Undang-Undang nomor 23 tahun 1997 pengelolaan lingkungan hidup di mana salah satu tujuannya mewujudkan pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan hidup), Indonesia membuktikan kepedulian mengenai isu lingkungan hidup, tidak hanya itu Indonesia juga meratifikasi Kyoto Protocol melalui Undang-Undang nomor 17 Tahun 2004, selanjutnya pada *The Conference of Parties* (COP) yang berlangsung Copenhagen, Denmark tahun 2009 Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi sebesar 26% pada tahun 2020 (Mulyana dan Wirahadikusumah, 2017), ini kemudian direvisi pada 2015 dengan target pengurangan emisi hingga 29% pada 2030 secara independen (Wibowo dkk, 2018).

Khusus untuk pekerjaan konstruksi jalan pemerintah Indonesia melalui Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 5/2015, tentang Pedoman Umum Implementasi Konstruksi Berkelanjutan pada Penyelenggaraan Infrastruktur Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan, menyatakan bahwa penyelenggara jalan harus mengimplementasikan pendekatan konstruksi berkelanjutan dengan memenuhi persyaratan keandalan teknis dan prinsip berkelanjutan. Prinsip pembangunan berkelanjutan mencakup aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan wajib dipertimbangkan dalam penggunaan sumber daya, agar sumber daya alam untuk generasi mendatang masih tersedia (Lawalata, 2019).

Beberapa penelitian tentang konsumsi energi dan emisi pada pekerjaan jalan telah dilakukan, di dalam negeri terdapat penelitian dengan mengumpulkan data mengenai konsumsi bahan bakar yang digunakan pada berbagai tahap pekerjaan pengaspalan jalan (perkerasan lentur) pada dua studi kasus, dimana perhitungan estimasi konsumsi energi dan emisi GRK, yang mengacu pada prosedur IPCC. Batasan tiga tahapan siklus proses yang diamati yaitu: 1). Tahap produksi campuran aspal panas, 2). Tahap transportasi material dan 3). Tahap pelaksanaan pekerjaan pengaspalan (Wirahadikusumah dan Sahana, 2012). Analisis konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca pada tahap konstruksi pada perkerasan kaku telah dilakukan dengan mengambil studi kasus pada ruas konstruksi jalan bebas hambatan Cismudawu, dengan panjang jalan yang diamati 800 meter (Mulyana dan Wirahadikusumah, 2017).

Sedangkan di luar negeri, telah dilakukan penelitian untuk membandingkan implikasi lingkungan dari perkerasan aspal dan perkerasan beton bertulang dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dari tahap ekstraksi bahan, tahap produksi/produksi, fase penggunaan, dan fase pembuangan akhir (atau akhir masa pakainya) (Horvath dan

Hendrickson, 1998). Penilaian inventaris siklus hidup singkat dari perkerasan beton bertulang (CRCP) yang terus menerus dan perkerasan aspal berkenaan dengan energi yang dikonsumsi oleh masing-masing jenis perkerasan untuk pembangunan jalan (Zapata dan Gambatese, 2005). Berdasarkan studi kasus proyek di China hasil studi terdapat usulan baru metode analisis inventaris untuk mengevaluasi emisi gas rumah kaca (GRK) dari konstruksi perkerasan semen Portland. Proses konstruksi perkerasan beton dibagi menjadi tiga fase, yaitu produksi bahan baku, pembuatan beton, dan konstruksi di lokasi perkerasan (Ma dkk, 2016). Penelitian lain yaitu dengan mengukur dampak lingkungan dari preservasi perkerasan menggunakan pendekatan penilaian siklus hidup. Kategori dampak lingkungan yang dipertimbangkan dalam LCA dapat mencakup pemanasan global, kesehatan manusia, kualitas ekosistem, pengasaman, penggunaan lahan, dan lain-lain. Dalam studi ini, penilaian dampak terbatas pada emisi karbon dioksida (CO₂) untuk potensi pemanasan global (Global Warming Potential/GWP) (Wang dkk, 2019). Penelitian terbaru di Brasil yang bertujuan untuk mengetahui beberapa dampak lingkungan yang terkait dengan pembangunan jalan raya beraspal menggunakan pendekatan penilaian siklus hidup dan data konstruksi jalan yang tersedia dari dua jalan raya Brasil (Grael dkk, 2021).

Saat ini, penelitian tentang konsumsi energi jalan berbeda di dalam dan luar negeri, karena perbedaan pada teknologi konstruksi, peralatan konstruksi dan bahan baku, dan variabilitas sumber data dasar relatif besar, yang mengarah pada kurangnya konsistensi antara hasil evaluasi (Fei dkk, 2017). Walaupun sudah terdapat beberapa penelitian tentang topik ini namun, masing-masing dari penelitian mengenai energi dan emisi memiliki keterbatasan berdasarkan pada jenis dan ketersediaan data yang digunakannya. Hal ini juga karena perbedaan dalam hal batas-batas sistem yang mencakup input energi, sehingga hasilnya tidak dapat dibandingkan (Dixit dkk, 2015), sehingga dengan demikian area ini masih menjadi topik yang menarik untuk diteliti.

Penilaian siklus hidup (*Life Cycle Assessment*) telah digunakan selama dua dekade terakhir untuk memperkirakan dampak lingkungan dari peningkatan infrastruktur. Penggunaan LCA telah mendapatkan perhatian dalam penilaian lingkungan dari berbagai produk dan proses sejak 1980-an. Namun, tidak seperti proses dan layanan di industri lain, LCA masih dalam tahap awal penerapan dalam sistem infrastruktur. Fokus utama dari studi LCA perkerasan yang ada selama dua dekade terakhir adalah pada perbandingan aspal dan perkerasan beton. Bahkan, telah ada upaya/gerakan di antara para ilmuwan dan praktisi untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari aspal dan perkerasan beton dan memperkenalkannya sebagai jenis perkerasan berkelanjutan. Terlepas dari semakin banyaknya literatur tentang LCA dalam perkerasan jalan, tidak ada konsensus mengenai jenis perkerasan apa yang memiliki keunggulan dalam hal kinerja lingkungan (Inyim dkk, 2016).

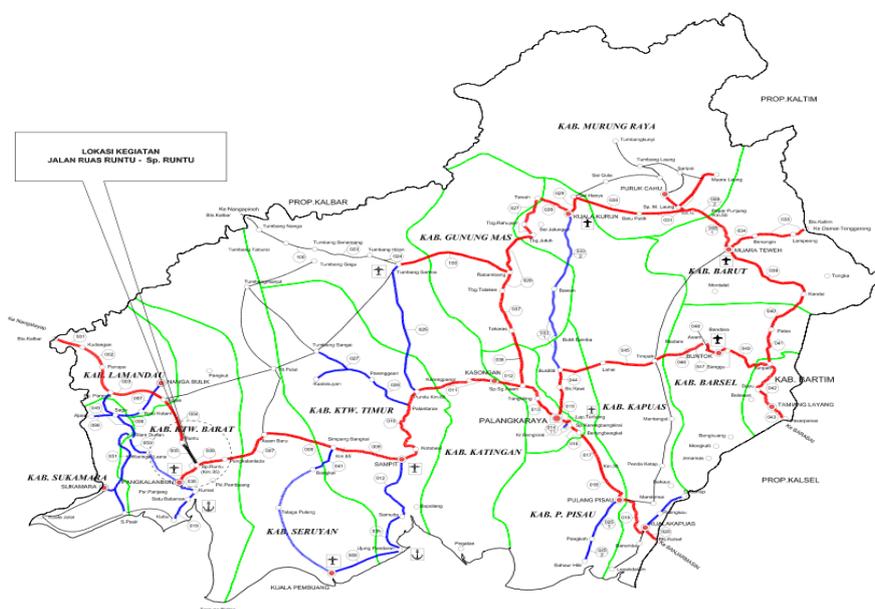
Studi LCA umumnya terdiri dari empat fase: tujuan dan ruang lingkup definisi, inventaris siklus hidup (LCI), penilaian dampak dan interpretasi hasil (ISO 14040:2006, 2006). Tujuan dan ruang lingkup mendefinisikan tujuan, objek, dan batasan sistem. *Life Cycle Inventory* (LCI) melibatkan pengumpulan data dan perhitungan untuk mengukur input dan output material dan energi dari suatu sistem, dan penilaian dampak mengevaluasi signifikansi potensi dampak lingkungan berdasarkan LCI (Ramesh dkk, 2010). Pada pekerjaan konstruksi jalan, baik perkerasan aspal dan perkerasan beton tahapan dari Life Cycle Assessment (LCA) terdiri dari: Produksi Material; Konstruksi; Pemeliharaan; Akhir Hidup (*end of life*)

Penelitian ini bertujuan mengetahui jenis perkerasan mana yang lebih ramah terhadap lingkungan ditinjau dari penggunaan energi dan emisi CO₂ yang dihasilkan, supaya bisa diketahui atau disimpulkan bahwa jenis perkerasan tersebut sebagai jenis perkerasan yang

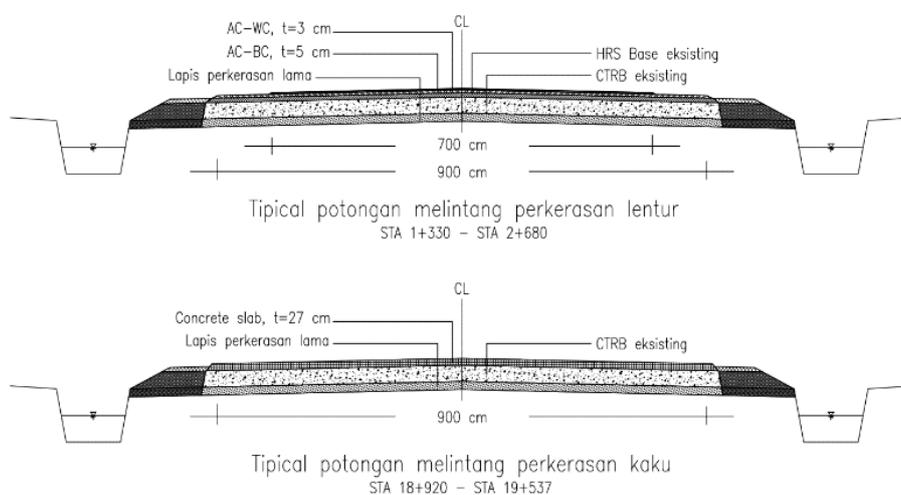
ramah lingkungan dan lebih berkelanjutan (*sustainable*) karena menimbulkan dampak yang lebih kecil sehingga tidak mengurangi kualitas hidup bagi generasi yang akan datang.

2. METODE

Pengambilan data dilakukan secara langsung di lapangan pada ruas Jalan Nasional yaitu: Sp. Runtu – Runtu – Kujan – Penopa – Kudangan – Batas Kalbar di Kabupaten Kotawaringin Barat dan Kabupaten Lamandau, yaitu dengan observasi dan wawancara; secara tidak langsung dengan studi pustaka, adapun lokasi kegiatan jalan ruas Sp. Runtu – Runtu (STA 0+000 – STA 21+410), seperti dapat dilihat pada Gambar 1. Ruas ini dipilih sebagai lokasi studi kasus karena pada ruas ini terdapat dua jenis perkerasan jalan, adapun gambar detail typical potongan melintang perkerasan lentur dan perkerasan kaku dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Peta Lokasi Kegiatan (Sumber: Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Teknis Jalan dan Jembatan Nasional Provinsi Kalimantan Tengah)



Gambar 2. Sketsa Typical Potongan Melintang Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku (Sumber: Leaflet Paket PW-01)

Data yang diperoleh dengan cara melakukan wawancara kepada konsultan pengawas dan kontraktor pelaksana, data tersebut berupa daftar pekerjaan dan kuantitas, *Job Mix Formula* (JMF), data alat berat pekerjaan aspal serta jarak *Asphalt Mixing Plant* (AMP) ke lokasi proyek, dan data alat berat pekerjaan beton serta jarak *Batching Plant* ke lokasi proyek. Alat berat pekerjaan aspal dan pekerjaan beton diobservasi di lokasi pekerjaan untuk mengetahui berapa konsumsi bahan bakar minyaknya, sedangkan jarak AMP dan *Batching Plant* ke lokasi pekerjaan divalidasi dengan mengukur jarak menggunakan odometer dan GPS. Data ini kemudian digunakan untuk melakukan penilaian terhadap *life cycle* produk yang diteliti dari tahap produksi hingga tahap konstruksi. Perhitungan penggunaan energi untuk menghitung *carbon footprint* dilakukan secara manual, menggunakan metode konversi energi berdasarkan konsumsi bahan bakar. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dianalisis pada penelitian ini adalah hanya Carbon Dioxide (CO₂). Rumus mengacu pada panduan Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Metode analisis yang digunakan untuk estimasi konsumsi energi adalah dengan konversi penggunaan bahan bakar kepada satuan energi standar (Joule). Untuk mendapatkan angka konsumsi energi dalam setiap produksi 1 ton masing-masing material perkerasan lentur dan material perkerasan kaku, perhitungan keduanya menggunakan persamaan (1) yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh (Mulyana dan Wirahadikusumah, 2017) yaitu sebagai berikut:

$$\text{Konsumsi Energi} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right) = \frac{\text{Konsumsi Bahan Bakar (liter)} \times \text{Calorific Value} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{liter}} \right)}{\text{Total Produksi (ton)}} \quad (1)$$

Estimasi jumlah emisi CO₂ per-ton produksi material perkerasan, mengacu pada persamaan (2) pada panduan IPCC adalah seperti dijelaskan pada persamaan:

$$\text{Emisi GRK} \left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{ton}} \right) = \frac{\text{Konsumsi Energi (MJ)} \times \text{Faktor Emisi} \left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}} \right)}{\text{Total Produksi (ton)}} \quad (2)$$

Untuk menghitung estimasi energi dengan menggunakan persamaan (3) berikut:

$$E = KB \times Cv \quad (3)$$

Dimana:

- E = Konsumsi Energi (MJ);
- KB = Konsumsi Bahan Bakar (liter);
- Cv = Calorific Value (MJ/liter)

Perhitungan emisi CO₂ per ton produksi material dengan menggunakan persamaan (4) berikut:

$$\text{GRK} = KB \times FE \quad (4)$$

Dimana:

- GRK = Emisi Gas Rumah Kaca (kgCO₂);
- KB = Konsumsi Bahan Bakar (liter);
- FE = Faktor Emisi (kgCO₂/liter)

Pengambilan data dilakukan secara langsung di lapangan, disertai dengan observasi dan wawancara. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk melakukan penilaian terhadap *life cycle* produk yang diteliti sesuai dengan tahapan berikut:

1. Menghitung kebutuhan campuran aspal pada perkerasan lentur (aspal) dan campuran beton pada perkerasan kaku (beton).

2. Menghitung konsumsi bahan bakar dan konsumsi energi alat-alat berat yang digunakan pada setiap tahapan *life cycle* yaitu dari tahap produksi hingga tahap konstruksi. Estimasi konsumsi bahan bakar dilakukan dengan melakukan konversi satuan kebutuhan bahan bakar dengan mengalikan konsumsi bahan bakar dengan angka konversi dari Tabel 1 konversi bahan bakar yang mengacu pada panduan dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).
3. Menghitung emisi pada setiap tahapan *life cycle* pada perkerasan jalan, estimasi emisi dilakukan dengan mengalikan kebutuhan bahan bakar dengan faktor emisi dari Tabel 1.
4. Membandingkan hasil perhitungan konsumsi bahan bakar, konsumsi energi dan emisi antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku.

Tabel 1. Faktor Konversi Energi

Type of Fuel	Density (kg/ltr)	Calorific Value (MJ/ltr)	Emission Factor (kgCO₂/ltr)
Diesel	0.837	35.99	2.67

Sumber : (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Teknis Perkerasan Lentur

Data teknis jalan dengan perkerasan lentur meliputi panjang jalan masing-masing lapisan aspal 1000 m, lebar jalan pada lapisan AC-WC yaitu 7 m dan tebal 0.03 m, sedangkan pada lapisan AC-BC dengan lebar 9 m dan tebal 0.05 m. Tabel 2 menunjukkan presentase komposisi material penyusun campuran aspal AC-WC dan AC-BC, dan Tabel 3 adalah komponen material penyusun 1-kilometer perkerasan lentur.

Tabel 2. Presentase Komposisi Material Penyusun Campuran Aspal

Campuran Aspal	Agregat (kg)	Filler (kg)	Aspal (kg)	Total (kg)	BJ (ton/m³)
AC-WC	751.7	7.5	41.2	800.4	2.317
	93.92%	0.94%	5.15%	100.00%	
AC-BC	752.3	7.5	40.6	800	2.325
	94.04%	0.94	5.08%	100.00%	

Tabel 3. Komponen Material Penyusun 1 Km Perkerasan Lentur

Komponen Penyusun	Agregat (ton)	Filler (ton)	Aspal (ton)	Total (ton)
AC-WC	456.96	4.56	25.05	486.57
	93.92%	0.94%	5.15%	100.00%
AC-BC	787.09	7.85	42.48	837.42
	93.99%	0.94%	5.07%	100.00%
Total	1244.06	12.41	67.52	1323.99
	93.96%	0.94%	5.10%	100.00%

3.2 Energi dan Emisi pada Perkerasan Lentur

Perhitungan estimasi konsumsi energi dan emisi perkerasan lentur pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tabel konversi bahan bakar. Data yang dibutuhkan untuk menghitung konsumsi energi dan emisi dengan metode konversi energi adalah data kebutuhan bahan bakar pada setiap tahapan *life cycle* perkerasan lentur kemudian dikonversi menjadi energi. Adapun besarnya total konsumsi bahan bakar, konsumsi energi

dan emisi pada perkerasan lentur dapat dilihat pada Tabel 4 berikut ini. Estimasi konsumsi material dan konsumsi BBM yang dibutuhkan untuk tahap perawatan selama umur rencana adalah 30 % dari masing-masing tahap produksi dan konstruksi. Asumsi *end-of-life* pada penelitian ini adalah dengan *re-use* perkerasan lama. Perkerasan lama akan menjadi lapisan *subbase* dari perkerasan baru, sehingga tidak ada *waste material* dan energi pada tahap *end-of-life* perkerasan lentur ini.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Energi dan Emisi pada Perkerasan Lentur

Tahap LCA	Total Konsumsi BBM	Total Konsumsi Energi	Total Emisi
	(liter/km)	(GJ/km)	(kgCO ₂ /km)
Tahap produksi	7074.61	254.61	18889.21
Tahap konstruksi	397.07	14.29	1060.18
Total	7471.68	268.91	19949.38

3.3 Data Teknis Perkerasan Kaku

Data teknis jalan dengan perkerasan kaku meliputi panjang jalan 1000 m, lebar jalan pada *concrete slab* yaitu 9 m, dan tebal lapisan *concrete slab* 0.27 m. Jenis campuran yang digunakan pada perkerasan kaku jalan ini adalah adalah beton dengan mutu *Flexure Strength* = 45 kg/cm² (FS.45). Pengertian dari FS.45 adalah karakteristik beton pada umur 28 hari mencapai 45 kg/cm². FS.45 setara dengan beton K350 – K400, dengan *Concrete Density* 2415 m³. Pada plat beton tulangan dowel menggunakan baja tulangan diameter 38 mm dan tie bars menggunakan baja tulangan diameter 12.5 mm, keduanya dengan BJ 7850 kg/m³. Adapun material penyusun campuran beton, dapat dilihat pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Material Penyusun Campuran Beton

Material	Tipe/Ukuran	Volume (m ³)	BJ (ton/m ³)
Semen	Tipe 1	0.13	0.40
Air	-	0.16	0.16
Agregat	Pasir	0.32	0.84
	10-20	0.15	0.40
	20-30	0.22	0.61

3.4 Energi dan Emisi pada Perkerasan Kaku

Perhitungan estimasi konsumsi energi dan emisi perkerasan kaku pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tabel konversi bahan bakar. Data yang dibutuhkan untuk menghitung konsumsi energi dan emisi dengan metode konversi energi adalah data kebutuhan bahan bakar pada setiap tahapan *life cycle* perkerasan lentur kemudian dikonversi menjadi energi. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Energi dan Emisi pada Perkerasan Kaku

Tahap LCA	Total Konsumsi BBM	Total Konsumsi Energi	Total Emisi
	(liter/km)	(GJ/km)	(kgCO ₂ /km)
Tahap produksi	16812.87	605.10	44890.35
Tahap konstruksi	196.41	7.07	524.40
Total	17009.27	612.16	45414.75

Diasumsikan tidak ada perawatan selama umur rencana perkerasan kaku, karena menurut beberapa sumber salah satu kelebihan perkerasan kaku adalah perawatan rutin yang minim bahkan bisa tidak ada perawatan sama sekali jika bahan dan proses konstruksi sesuai

dengan spesifikasi. Asumsi *end-of-life* pada perkerasan kaku, beton yang sudah kehilangan fungsi strukturnya akan digantikan oleh beton yang lain dengan cara *overlay*, atau melakukan rekonstruksi. Beton yang telah habis masa daur hidupnya menjadi *subbase* beton yang baru.

3.5. Perbandingan Energi dan Emisi Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku

Berdasarkan hasil perhitungan pada tahap produksi dan konstruksi, jumlah konsumsi bahan bakar untuk konstruksi perkerasan kaku lebih besar daripada perkerasan lentur yaitu: pada tahap produksi, perkerasan lentur lebih sedikit mengkonsumsi bahan bakar yaitu sebesar 7074.61 liter/km, sedangkan pada perkerasan kaku sebesar 16812.87 liter/km. Pada tahap konstruksi perkerasan kaku lebih sedikit mengkonsumsi bahan bakar yaitu sebesar 196.41 liter/km, sedangkan pada perkerasan lentur sebesar 397.07 liter/km. Secara total jumlah konsumsi bahan bakar yang digunakan untuk konstruksi perkerasan lentur adalah 7471.68 liter/km, dan konstruksi perkerasan kaku 17009.27 liter/km. Berdasarkan hasil perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 7 maka terdapat perbandingan hasil antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku, yaitu: pada tahap produksi, perkerasan lentur lebih sedikit mengkonsumsi bahan bakar dan energi yaitu masing-masing sebesar 7074.61 liter/km dan sebesar 254.61 GJ serta lebih sedikit menghasilkan emisi yaitu sebesar 18889.21 kgCO₂/km.

Tabel 7. Rekapitulasi Perbandingan Perhitungan Konsumsi BBM, Energi, dan Emisi Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku

Tahap LCA	Total Konsumsi BBM (liter/km)		Total Konsumsi Energi (GJ/km)		Total Emisi (kgCO ₂ /km)	
	Lentur	Kaku	Lentur	Kaku	Lentur	Kaku
Tahap produksi	7074.61	16812.87	254.61	605.10	18889.21	44890.35
Tahap konstruksi	397.07	196.41	14.29	7.07	1060.18	524.40
Total	7471.68	17009.27	268.91	612.16	19949.38	45414.75

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, hasil penelitian pada pekerjaan perkerasan lentur, tahap produksi aspal di *Asphalt Mixing Plant* (AMP) paling dominan mengkonsumsi energi dan menghasilkan emisi gas rumah kaca (Kim dkk, 2012). Pada perkerasan lentur emisi CO₂e tertinggi dihasilkan oleh penggunaan pabrik untuk kegiatan di lokasi untuk kegiatan pengahamparan beton aspal menyumbang 34.83 ton CO₂e (49.13%), dan transportasi material menyumbang 24.92 (35.16%) (Mulyana dan Wirahadikusumah, 2017). Pada tahap konstruksi perkerasan kaku lebih sedikit mengkonsumsi bahan bakar dan energi yaitu masing-masing sebesar 196.41 liter/km dan sebesar 7.07 GJ serta lebih sedikit menghasilkan emisi yaitu sebesar 524.40 kgCO₂/km. Konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca pada perkerasan kaku paling banyak pada tahap produksi dan konstruksi, dari seluruh kegiatan konstruksi perkerasan kaku, proses pengolahan material paling banyak memerlukan energi dan mengeluarkan emisi (Wirahadikusumah dan Sahana, 2012).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan pada tahap produksi dan konstruksi, jumlah konsumsi energi untuk perkerasan kaku lebih besar daripada perkerasan lentur yaitu masing-masing sebesar 612.16 GJ dan 268.91 GJ. Hasil perhitungan emisi menunjukkan perbandingan bahwa

perkerasan kaku menyumbang emisi CO₂ lebih besar jika dibandingkan terhadap perkerasan lentur. Perkerasan kaku mempunyai total emisi sebesar 45414.75 kgCO₂/km sedangkan perkerasan lentur sebesar 19949.38 kgCO₂/km. Sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa secara total tahapan LCA perkerasan lentur lebih lebih ramah terhadap lingkungan dan lebih berkelanjutan dibandingkan dengan perkerasan kaku, karena lebih sedikit mengkonsumsi bahan bakar, lebih sedikit mengkonsumsi energi serta lebih sedikit menghasilkan emisi CO₂.

Untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan perhitungan konsumsi energi pada proses penambangan dan pengolahan *raw material* di *quarry*, serta perhitungan kebutuhan energi dan emisi yang dihasilkan pada tahap perawatan dan *end-of-life* perkerasan lentur dan perkerasan kaku dengan melakukan *survey* dan pengumpulan data yang berkaitan dengan masa perawatan selama umur konstruksi perkerasan lentur dan perkerasan kaku.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Palangka Raya melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat yang telah mendanai penelitian dan penulisan artikel ini, dengan skema hibah Penelitian Terapan Inovatif nomor: 328/UN24.13/PL/2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Dixit, M. K., Culp, C. H., & Fernandez-Solis, J. L. (2015). Embodied energy of construction materials: Integrating human and capital energy into an IO-based hybrid model. *Environmental Science and Technology*. Vol.49(3), 1936–1945. <https://doi.org/10.1021/es503896v>
- Fei, L., Zhang, Q., & Xie, Y. (May 2017). Study on energy consumption evaluation of mountainous highway based on LCA. 3rd International Conference on Advances in Energy, *Environment and Chemical Engineering*. Vol.69, 012036–012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012036>
- Grael, P. F. F., Oliveira, L. S. B. L., Oliveira, D. S. B. L., & Bezerra, B. S. (2021). Life cycle inventory and impact assessment for an asphalt pavement road construction—a case study in Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol.26(2), 402–416. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01842-5>
- Horvath, A., & Hendrickson, C. (1998). Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced. *Transportation Research Record* 1626, 1626(98), 105–113.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, eds.). Retrieved from Institute for Global Environmental Strategies (IGES) website: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., & Mostafavi, A. (2016). Environmental assessment of

- pavement infrastructure: A systematic review. *Journal of Environmental Management*. Vol.176, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.042>
- ISO 14040:2006. (2006). *Environmental management - life cycle assessment - principles and framework*. (2nd ed, Vol. 44). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- Isya, M., Rani, H. A., & Utama, F. P. (October 2019). Effect of Green Road Concept on Waste Management on Road Construction in the Banda Aceh City. *1st International Postgraduate Conference on Mechanical Engineering (IPCME2018)*. Vol.469, 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012061>
- Kim, B., Lee, H., Park, H., & Kim, H. (2012). Framework for Estimating Greenhouse Gas Emissions Due to Asphalt Pavement Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. Vol.138(11), 1312–1321. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000549](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000549)
- Kucukvar, M., & Tatari, O. (2012). Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol.17(1), 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.006>
- Lawalata, G. M. (2013). Sustainable Road Development Principles. *Jurnal Transportasi*. Vol.13(2), 115–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.26593/jt.v13i2.531.%25p>
- Lawalata, G. M. (2019). Peningkatan Jalan Hijau untuk Mendukung Implementasi Program Konstruksi Jalan Berkelanjutan. *Jurnal HPJI*. Vol.5(1), 21–30.
- Ma, F., Sha, A., Yang, P., & Huang, Y. (2016). The Greenhouse Gas Emission from Portland Cement Concrete Pavement Construction in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol.13(632), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>
- Meijer, J. R., Huijbregts, M. A. J., Schotten, K. C. G. J., & Schipper, A. M. (2018). Global patterns of current and future road infrastructure. *Environmental Research Letters*. Vol.13(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabd42>
- Mulyana, A., & Wirahadikusumah, R. (2017). Analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions in the construction phase case study: construction of Cisumdawu road. *Jurnal Teknik Sipil ITB*. Vol.24(3), 269–280. <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.3.10>
- Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*. Vol.42(10), 1592–1600. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>

- Santos, J., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2015). A life Cycle Assessment Model for Pavement Management: Road Pavement Construction and Management in Portugal. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol.16(4), 315–336. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.942862>
- Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt Mixtures Emission and Energy Consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.72(June 2015), 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>
- Wang, H., Al-Saadi, I., Lu, P., & Jasim, A. (2019). Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment. *International Journal of Sustainable Transportation*. Vol.14(1), 25–34. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1519086>
- Wibowo, M. A., Uda, S. A. K. A., & Zhabrinna. (July 2018). Reducing carbon emission in construction base on project life cycle (PLC). *The 4th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE 2018)*. Vol.195, 1–11. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819506002>
- Wirahadikusumah, R., & Sahana, H. (2012). Estimasi Konsumsi Energi Dan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Pekerjaan Pengaspalan Jalan. *Jurnal Teknik Sipil ITB*. Vol.19(1), 25–36.
- Zapata, P., & Gambatese, J. A. (2005). Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. *Journal of Infrastructure Systems*. Vol.11(1), 9–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9))
- Zheng, Z., Gao, X., Wang, J., & Ji, X. (June 2019). Prediction Model for Energy Consumption and Carbon Emission of Asphalt Surface Construction. 2019 International Conference on Advances in Civil Engineering, *Energy Resources and Environment Engineering*. Vol.330, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/2/022052>