
PERAN BUILDING ENERGY MODELING (BEM) DALAM MENGANALISIS EMISI KARBON PADA KONSTRUKSI JALAN ANGKUT TAMBANG BATUBARA

Azwar Samitra*, Oei Fuk Jin

Universitas Tarumanagara, Indonesia

Emails: azsamitan@gmail.com, fukjin.untar@gmail.com

Abstrak

Pembangunan jalan pertambangan di Indonesia sering kali melibatkan penggunaan agregat beton dan bahan aspal, yang berdampak signifikan terhadap emisi karbon. Dengan meningkatnya kesadaran akan perubahan iklim, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis emisi karbon yang dihasilkan selama proses pembangunan jalan tambang dan menilai peran teknologi Building Energy Modeling (BEM) dalam mitigasi emisi tersebut. Metode penelitian meliputi pengumpulan data detail tentang desain teknik, biaya material, dan koefisien emisi karbon, dengan analisis yang berfokus pada perhitungan emisi karbon dari masing-masing material dan penerapan teknologi BEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total emisi karbon yang dihasilkan dari pembangunan jalan tambang PT ABC mencapai 796.713 ton CO₂. Penerapan teknologi BEM berpotensi mengurangi emisi karbon hingga 30%, sehingga total CO₂ tersisa sebanyak 557.799 ton. Studi ini memberikan wawasan penting tentang dampak lingkungan dari sektor konstruksi dan manfaat memanfaatkan teknologi inovatif untuk perencanaan yang lebih berkelanjutan. Kesimpulannya, penelitian ini menekankan perlunya mengintegrasikan praktik konstruksi berkelanjutan dan mengadopsi teknologi BEM dalam proyek jalan pertambangan untuk mendukung target nasional Indonesia dalam pengurangan emisi gas rumah kaca. Rekomendasi dibuat bagi pembuat kebijakan dan praktisi untuk fokus pada pengembangan infrastruktur ramah lingkungan untuk mencapai keberlanjutan di sektor konstruksi.

Kata kunci: Emisi karbon, Konstruksi jalan, BEM, Agregat, Aspal.

Abstract

The construction of mining roads in Indonesia often involves the use of concrete aggregate and asphalt materials, which have a significant impact on carbon emissions. With the growing awareness of climate change, this research aims to analyze the carbon emissions produced during the construction process of mining roads and assess the role of Building Energy Modeling (BEM) technology in mitigating these emissions. The research method includes gathering detailed data on engineering design, material costs, and carbon emission coefficients, with analysis focusing on the calculation of carbon emissions from each material and the application of BEM technology. The results indicate that the total carbon emissions generated from the construction of the PT ABC mining road reach 796,713 tons of CO₂. The implementation of BEM technology has the potential to reduce carbon emissions by up to 30%, resulting in a remaining total of 557,799 tons of CO₂. This study provides important insights into the environmental impact of the construction sector and the benefits of utilizing innovative technology for more sustainable planning. In conclusion, this research emphasizes the necessity of integrating sustainable construction practices and adopting BEM technology in mining road projects to support Indonesia's national targets for reducing greenhouse gas emissions. Recommendations are made for policymakers and practitioners to focus on developing environmentally friendly infrastructure to achieve sustainability in the construction sector.

Keywords: Carbon emission, Road construction, BEM, Aggregate, Asphalt.

Corresponding: Azwar Samitra

E-mail: azsamitan@gmail.com



PENDAHULUAN

Emisi karbon pada konstruksi jalan angkut tambang batu bara, khususnya di Indonesia yang pada tahun 2060 memiliki komitmen untuk mencapai nol emisi yang bersih (Biro Komunikasi Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi, 2022). Sektor konstruksi, terutama penggunaan material seperti material agregat, beton dan aspal, menunjukkan sebagai penyumbang emisi karbon yang cukup besar (Marpaung, 2014a).

Masalah yang teridentifikasi dalam penelitian ini mencakup peningkatan emisi karbon dioksida dari sektor konstruksi, terutama dalam pembangunan jalan angkut tambang batubara dalam hal penggunaan material agregat, beton maupun aspal cukup berkontribusi besar terhadap emisi karbon, dan ini juga menambah tantangan dalam hal mencari alternatif lain ataupun menggunakan material yang lebih berkelanjutan (Marpaung, 2014a). Selain itu, meskipun di era teknologi saat sekarang ini, seperti *tools Building Energy Modeling* (BEM) membantu untuk menganalisis emisi karbon yang dihasilkan dari penggunaan material yang akan digunakan dan mempermudah dalam merencanakan proyek konstruksi jalan angkut tambang secara mendalam (Wijaya & Jin, 2024).

Urgensi penelitian ini terletak pada potensi untuk memberikan pengetahuan dalam praktik konstruksi berkelanjutan (Du et al., 2019). Harapannya penelitian ini dapat memperkaya literatur yang sudah ada dan juga memberikan gambaran praktis bagi industri (Trencher, 2020).

Masih kurangnya studi detail yang fokus pada analisis emisi karbon dalam penggunaan material pembangunan jalan angkut tambang dengan pendekatan BEM menjadikan salah satu kebutuhan untuk analisis dan mengidentifikasi faktor-faktor penyebab emisi karbon yang lebih spesifik (Yao et al., 2018).

Batasan penelitian ini mencakup fokus pada konstruksi jalan tambang di PT ABC, tanpa melibatkan proyek konstruksi lainnya. Analisis akan mengandalkan pendekatan BEM untuk menghitung emisi karbon selama tahap konstruksi, tanpa mempertimbangkan dampak pasca-konstruksi atau emisi gas rumah kaca lainnya (C. Wang et al., 2024). Semua data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari proyek PT ABC, sehingga tidak membandingkan hasil dengan proyek lain yang mungkin memiliki karakteristik yang berbeda (Fisch-Romito & Guivarch, 2019).

Material Pekerjaan pada Konstruksi Jalan

Agregat dan aspal merupakan material utama yang digunakan dalam konstruksi jalan, namun penggunaannya sering dihubungkan dengan dampak lingkungan yang berat, termasuk emisi karbon yang tinggi akibat produksi dan transportasi mereka (X. Wang et al., 2019). Struktur jalan yang menggunakan bahan ini dapat meningkatkan jejak karbon secara signifikan. Oleh karena itu, pemilihan material alternatif yang lebih ramah lingkungan sangat diperlukan dalam konteks keberlanjutan (Chen et al., 2021).

Emisi Karbon

Emisi karbon yang dihasilkan oleh sektor konstruksi, khususnya jalan tambang, telah menjadi perhatian besar di Indonesia dan di seluruh dunia. Sebuah studi merujuk bahwa emisi karbon pada jalan raya di Indonesia mencapai 3175,67 g/kg BBM (Q.-Z. Wang et al., 2020). Ini menunjukkan pentingnya melakukan evaluasi dan pengendalian emisi untuk mengurangi dampak negatif dari pembangunan jalan.

Pada metode ini menghitung nilai emisi karbon menggunakan pendekatan nilai inventori *embodied energy* (*University of Bath*) dapat dilihat pada formula di berikut (Jurizat & Ramadhan, 2020):

$$Vm = \frac{Vs}{Vj} \quad (1)$$

dengan :

V_m = Volume berat (kg)

V_s = Volume (m³)

V_j = Berat jenis (m³/kg)

EC = *Emission Carbon*

CEC = *Coefficient Emission Carbon* (CO₂)

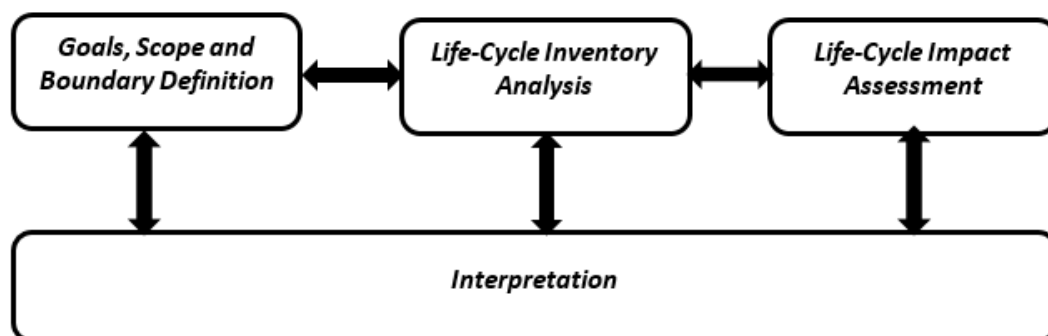
Table 1. Nilai *Coefficient Energy Carbon* (Sumber: *Iventory of Carbon and Energy*, 2021)

No	Nama material dan komponen	Nilai Emisi (KgCO ₂)
1	Cement	0,74
2	Concrete 20/25	0,107
3	Bar and Road	1,31
4	Ceramics	0,66
5	Plywood	0,81
6	Timber	0,45
7	Glass	0,86
8	Alumunium	1,69
9	Sand	0,0048
10	Cat	2,42
11	Gravel	0,0048
12	Water	0,001

Life Cycle Assessment (LCA)

Life cycle assessment merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari material sepanjang siklus hidup mereka (Marpaung, 2014b). Penggunaan LCA dalam analisis emisi karbon akan memberikan gambaran yang jelas tentang dampak dari material yang digunakan dalam konstruksi jalan. Dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa perkerasan lentur lebih ramah lingkungan dibandingkan perkerasan kaku dalam konteks emisi (Liu et al., 2022).

Menurut ISO 14040/44 tahapan melakukan LCA sesuai standar digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Fase LCA (ISO 14040)

Building Energy Modeling (BEM)

Building Energy Modeling (BEM) memberikan analisis mendalam tentang konsumsi energi dan emisi karbon selama proses konstruksi (Herman Hendra Jurusan Arsitektur -Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2016). Teknologi ini dapat membantu mengidentifikasi area untuk perbaikan dan pengurangan emisi, yang sangat penting untuk mencapai tujuan keberlanjutan di sektor konstruksi.

Peningkatan emisi karbon dari sektor konstruksi, khususnya pembangunan jalan angkut tambang batubara, menjadi perhatian serius di tengah komitmen Indonesia untuk mencapai netral karbon pada tahun 2060. Material seperti agregat, beton, dan aspal yang digunakan dalam proyek jalan tambang diketahui memberikan kontribusi besar terhadap jejak karbon. Namun, belum banyak pendekatan teknologi yang diterapkan secara sistematis untuk memetakan dan mengurangi emisi ini selama tahap konstruksi.

Urgensi penelitian ini terletak pada pentingnya menyediakan data kuantitatif dan analisis mendalam terhadap dampak lingkungan dari pemilihan material konstruksi jalan tambang. Dengan semakin meningkatnya regulasi dan tekanan global terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, sektor konstruksi memerlukan pendekatan berbasis teknologi untuk mendukung pengambilan keputusan yang ramah lingkungan. Pemanfaatan alat analisis seperti Building Energy Modeling (BEM) menjadi sangat relevan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis emisi karbon dan menentukan strategi pengurangan yang efektif.

Selain itu, pembangunan jalan tambang seringkali diabaikan dalam diskursus pembangunan berkelanjutan. Padahal, jenis infrastruktur ini memiliki dampak lingkungan yang besar karena melibatkan pekerjaan volume tinggi dan material padat energi. Penelitian ini menjadi krusial untuk mendorong transisi menuju praktik konstruksi yang lebih hijau dan untuk membekali para praktisi serta pembuat kebijakan dengan bukti empiris tentang manfaat penggunaan teknologi seperti BEM.

Marpaung (2014) dan Jurizat & Ramadhan (2020) telah menunjukkan bahwa beton dan aspal menghasilkan emisi karbon yang signifikan dalam proyek infrastruktur jalan, namun pendekatan pengukuran mereka masih bersifat konvensional dan belum mengintegrasikan simulasi teknologi.

Du et al. (2019) dan Liu et al. (2022) meninjau emisi karbon dalam siklus hidup proyek transportasi dan menyarankan pentingnya penggunaan Life Cycle Assessment (LCA), namun tidak secara spesifik membahas jalan tambang dan penggunaan teknologi BEM sebagai alat mitigasi.

Penelitian Wijaya & Jin (2024) memperkenalkan konsep bangunan hijau dalam penjadwalan proyek konstruksi, namun belum fokus pada kuantifikasi emisi karbon dari pemilihan material. Maka, ada kebutuhan untuk memperluas analisis ke sektor jalan tambang dan menyelaraskan desain teknis dengan hasil emisi aktual menggunakan alat simulasi seperti BEM.

Sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada infrastruktur jalan umum dan tidak secara spesifik menyoroti proyek jalan tambang, padahal karakteristik dan penggunaan materialnya berbeda. Selain itu, pendekatan yang digunakan cenderung menggunakan data sekunder atau estimasi kasar tanpa pemodelan berbasis teknologi. Belum banyak studi yang mengintegrasikan pendekatan BEM dalam menghitung dan memprediksi emisi karbon dari proyek jalan angkut tambang di Indonesia secara spesifik.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penerapan Building Energy Modeling (BEM) untuk menganalisis secara kuantitatif kontribusi emisi karbon dari berbagai jenis material konstruksi pada proyek jalan tambang batubara. Penelitian ini tidak hanya menghitung emisi

secara manual, tetapi juga membandingkannya dengan hasil simulasi BEM untuk menilai efektivitas teknologi tersebut dalam merancang konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisis emisi karbon dari konstruksi jalan angkut tambang batubara dengan pendekatan manual dan teknologi BEM, serta mengevaluasi efektivitas BEM sebagai alat untuk mengurangi dampak lingkungan dalam perencanaan infrastruktur.

Penelitian ini memberikan manfaat praktis bagi dunia industri dan pembuat kebijakan dengan menyediakan pendekatan terukur dan berbasis teknologi untuk merancang proyek konstruksi yang lebih berkelanjutan. Selain itu, secara akademik penelitian ini memperkaya literatur tentang analisis emisi karbon pada proyek infrastruktur spesifik seperti jalan tambang yang selama ini masih jarang dibahas secara mendalam.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bertujuan untuk menghitung emisi karbon pada konstruksi jalan tambang batubara di PT ABC melalui dua metode utama: perhitungan manual dan simulasi menggunakan Building Energy Modeling (BEM). Langkah pertama yang dilakukan adalah pengumpulan data sekunder dari dokumen proyek, termasuk gambar desain teknik, volume material dari RAB (Rencana Anggaran Biaya), serta nilai koefisien emisi karbon dari setiap material seperti agregat, beton, dan aspal. Setelah itu, dilakukan perhitungan manual emisi karbon berdasarkan rumus yang menggabungkan volume material, berat jenis, dan nilai emisi karbon per satuan material dari sumber resmi (University of Bath – Inventory of Carbon and Energy).

Selanjutnya, penelitian ini melakukan pemodelan dengan BEM untuk mensimulasikan potensi emisi karbon yang dihasilkan selama proses konstruksi. BEM digunakan untuk mengevaluasi emisi berdasarkan jenis material, lokasi proyek, dan kondisi teknis, sehingga hasil simulasi dapat dibandingkan dengan perhitungan manual. Hasilnya menunjukkan bahwa teknologi BEM mampu mengidentifikasi peluang efisiensi yang signifikan dan memprediksi pengurangan emisi karbon hingga 30%. Metode ini tidak hanya memperkuat validitas data, tetapi juga memberikan wawasan strategis bagi pengambil kebijakan dan praktisi konstruksi untuk merancang proyek yang lebih ramah lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan emisi karbon yang dihasilkan dari penggunaan material seperti agregat, aspal, dan beton pada proyek jalan tambang PT ABC yang berlokasi di Sangata, Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur, dengan panjang jalan yang dianalisis adalah 2 km yaitu dari sta 0+700 sampai sta 2+600. Data perhitungan volume material jalan tambang yang digunakan dalam analisis ini meliputi dua jenis jalan, yaitu jalan tambang CBR 90% dan CBR 60%, serta jalan nasional dan kabupaten yang bersinggungan dengan jalan angkut tambang batubara.

Pada pekerjaan jalan tambang dengan CBR 90%, volume agregat yang digunakan adalah 10.108 m³. Mengacu pada penelitian terdahulu, emisi karbon yang dihasilkan oleh agregat diperkirakan sekitar 0,027 ton CO₂ per m³ dan untuk beton 0,1 ton CO₂ per m³. Dengan demikian, perhitungan emisi karbon untuk agregat dan beton dapat dihitung sebagai berikut: Untuk agregat CBR 90% (kelas-A), agregat yang digunakan yaitu 3.504 m³ dengan menghasilkan emisi karbon sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Emisi Karbon} &= 3.504 \text{ m}^3 \times 0,0027 \text{ ton CO}_2/\text{m}^3 \\ &= 9.462 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Untuk agregat CBR 60% (kelas-B), agregat yang digunakan yaitu 12.105 m³ dengan menghasilkan emisi karbon sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Emisi Karbon} &= 12.105 \text{ m}^3 \times 0,0027 \text{ ton CO}_2/\text{m}^3 \\ &= 32.686 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Untuk emisi karbon dari beton juga dihitung. dengan volume 3.238 m³ dan emisi 0,25 ton CO₂ per m³, hasil perhitungan adalah:

$$\begin{aligned} \text{Emisi Karbon} &= 3.238 \text{ m}^3 \times 0,1 \text{ ton CO}_2/\text{m}^3 \\ &= 323,8 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Total emisi karbon dari perhitungan manual

Setelah menghitung emisi karbon dari setiap jenis material yang dihasilkan dari proyek pembangunan jalan angkut tambang batu bara PT ABC dapat disimpulkan sebagai berikut:

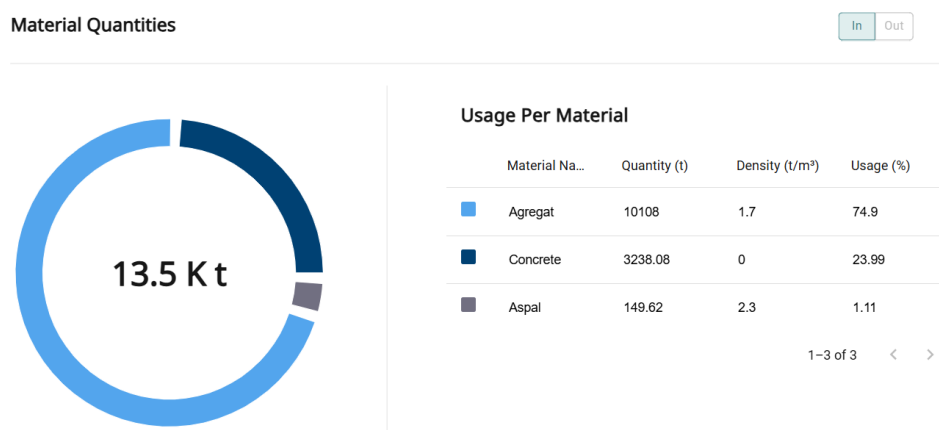
- Total emisi karbon dari jalan angkut tambang dengan material agregat CBR 90% (kelas-A) adalah 9.462 ton CO₂
- Total emisi karbon dari jalan angkut tambang dengan material agregat CBR 60% (kelas-B) adalah 32.686 ton CO₂
- Total karbon dari jalan angkut tambang dengan material beton adalah 323,8 ton CO₂

Menghitung total keseluruhan dari semua yang telah dihitung, didapat:

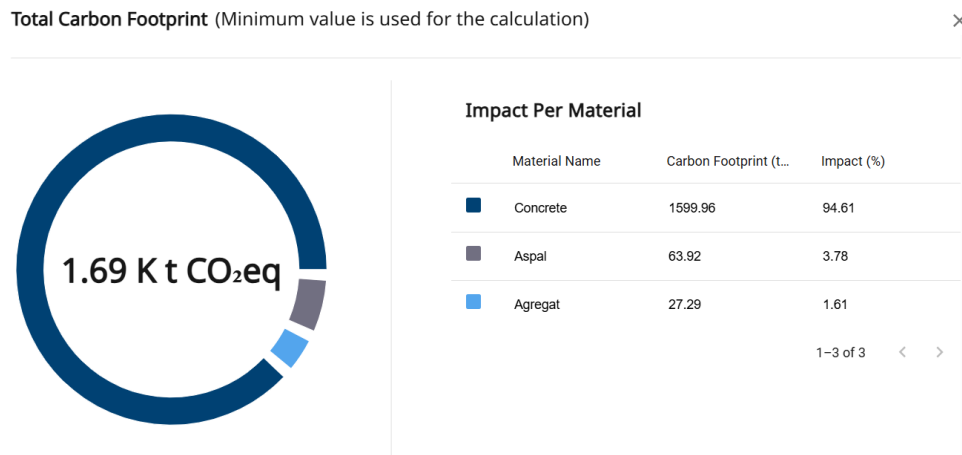
$$\begin{aligned} \text{Total Emisi CO}_2 &= 9.462 + 32.686 + 323,8 \\ &= 365.956,8 \text{ ton CO}_2 \end{aligned}$$

Hasil Modelling dengan BEM

Penggunaan teknologi *Building Energy Modeling* (BEM) dalam menganalisis emisi karbon dengan menggunakan variabel-variabel yang berpengaruh terhadap jenis pemilihan material dan lokasi proyek. Perbandingan dari pemodelan dan perhitungan manual menghasilkan perbedaan sebagai berikut:



Gambar 2. Jumlah penggunaan material



Gambar 3. Total Carbon Footprint material

Perhitungan Emisi =796,713ton CO₂×0,3
=238,914ton CO₂

Penerapan BEM menjadi:

Emisi Tersisa =796,713–238,914
=557,799ton CO₂

KESIMPULAN

Hasil perhitungan dan analisis menunjukkan bahwa sektor konstruksi jalan, khususnya pada proyek jalan tambang, memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon di Indonesia. Penggunaan material seperti agregat dan aspal menjadi penyumbang utama emisi selama proses pembangunan. Penerapan teknologi inovatif seperti Building Energy Modeling (BEM) terbukti efektif sebagai alat bantu untuk menganalisis dan memprediksi besarnya emisi karbon berdasarkan jenis material yang digunakan. Hasil studi ini menegaskan bahwa BEM dapat menjadi solusi strategis dalam meminimalkan dampak lingkungan dari konstruksi jalan tambang, sejalan dengan komitmen pembangunan berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan agar proses perencanaan dan pelaksanaan proyek jalan ke depan tidak hanya berorientasi pada efisiensi teknis dan biaya, tetapi juga mempertimbangkan keberlanjutan lingkungan dengan mengintegrasikan teknologi BEM dan pemilihan material yang rendah emisi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan analisis komparatif antara beberapa proyek jalan tambang di berbagai wilayah guna mengevaluasi efektivitas BEM dalam konteks geografis yang berbeda, serta memperluas cakupan variabel dengan mempertimbangkan fase operasional dan pemeliharaan dalam siklus hidup infrastruktur jalan.

DAFTAR PUSTAKA

Biro Komunikasi Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi. (2022, November 11). *Komitmen Net Zero Carbon Tahun 2060, Indonesia Seimbangkan Target Emisi dan Target Pembangunan Ekonomi*. <https://Maritim.Go.Id/Detail/Komitmen-Net-Zero-Carbon-Tahun-2060-Indonesia-Seimbangkan-Target-Emisi-Dan-Target-Pembangunan-Ekonomi>.

- Chen, P., Lu, Y., Wan, Y., & Zhang, A. (2021). Assessing carbon dioxide emissions of high-speed rail: The case of Beijing-Shanghai corridor. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97, 102949. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102949>
- Du, H., Chen, Z., Peng, B.-B., Southworth, F., Ma, S., & Yuan, W. (2019). What drives CO2 emissions from the transport sector? A linkage analysis. *Energy*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.052>
- Fisch-Romito, V., & Guivarch, C. (2019). Transportation infrastructures in a low carbon world: An evaluation of investment needs and their determinants. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.014>
- Herman Hendra Jurusan Arsitektur -Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, F. (2016). PEMBANGUNAN PERUMAHAN RENDAH EMISI KARBON DI SURABAYA TIMUR. In *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan IV*.
- Jurizat, A., & Ramadhan, T. (2020). Embodied Energy Pada Dinding Bambu Anyaman Dan Plester. *Jurnal Arsitektur Zonasi*, 3(2).
- Liu, N., Wang, Y., Bai, Q., Liu, Y., Wang, P. S., Xue, S., Yu, Q., & Li, Q. (2022). Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(4), 532–555.
- Marpaung, R. (2014a). PERBANDINGAN EMISI CO2 MENGGUNAKAN BETON DAN ASPAL (STUDI KASUS REKONSTRUKSI JALAN NASIONAL PROVINSI RIAU). *Jurnal Sosek Pekerjaan Umum*, 6(3).
- Marpaung, R. (2014b). PERBANDINGAN EMISI CO2 MENGGUNAKAN BETON DAN ASPAL (STUDI KASUS REKONSTRUKSI JALAN NASIONAL PROVINSI RIAU). *Jurnal Sosek Pekerjaan Umum*, 6(3).
- Trencher, G. (2020). Strategies to accelerate the production and diffusion of fuel cell electric vehicles: Experiences from California. *Energy Reports*, 6, 2503–2519. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.008>
- Wang, C., Yao, X., Ma, K., Zhang, C., Dang, S., Fan, M., Luo, W., Zheng, Y., Pan, C., & Ren, G. (2024). A Study of Carbon Emissions during the Operational Period of an Integrated Expressway Construction Station. *Sustainability*, 16, 7384. <https://doi.org/10.3390/su16177384>
- Wang, Q.-Z., Wang, N.-N., Tseng, M.-L., Huang, Y.-M., & Li, N.-L. (2020). Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119411.
- Wang, X., Zheng, H., Wang, Z., Shan, Y., Meng, J., Liang, X., Feng, K., & Guan, D. (2019). Kazakhstan's CO2 emissions in the post-Kyoto Protocol era: Production- and consumption-based analysis. *Journal of Environmental Management*, 249, 109393. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109393>
- Wijaya, D., & Jin, O. F. (2024). Penerapan Manajemen Penjadwalan Dengan Konsep Bangunan Hijau. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 20(3), 190–198. <https://doi.org/10.25077/jrs.20.3.190-198.2024>
- Yao, Q., Han, M., & Liu, W. (2018). Tracking embodied carbon flows in the Belt and Road regions. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, 73, 2210–2222. <https://doi.org/10.11821/dlxb201811012>