

Analisis Perbandingan Perencanaan Tebal Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Metode AASHTO 1993 dan MDP 2024 dalam Konteks Kebijakan Transportasi Berkelanjutan

Rafi Sugema, dan Robi Maulana

Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

rafi.sugema@student.unjani.ac.id, robim3084@gmail.com

Abstrak

Perkerasan jalan lentur memiliki peran vital dalam pembangunan infrastruktur transportasi yang efisien dan ramah lingkungan. Di Indonesia, metode AASHTO 1993 telah lama digunakan sebagai pedoman standar dalam perencanaan tebal perkerasan. Namun, dengan hadirnya Manual Desain Perkerasan 2024 yang lebih adaptif terhadap kondisi lokal, evaluasi perbandingan antara kedua metode ini menjadi penting, terutama dalam mendukung kebijakan transportasi berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana masing-masing metode berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan, penggunaan material, dan efisiensi energi. Melalui *literature review* integratif, penelitian ini menemukan bahwa MDP 2024 menawarkan desain perkerasan yang lebih efisien dalam penggunaan material dan energi, sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon. Namun, tantangan dalam penerapan teknologi ramah lingkungan dan keterbatasan data geoteknik masih perlu diatasi. Penelitian ini menyarankan penggunaan MDP 2024 untuk mendukung kebijakan transportasi yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

Kata kunci: AASHTO 1993, MDP 2024, transportasi berkelanjutan, tebal perkerasan, dampak lingkungan

Abstract

Flexible pavement plays a vital role in the development of efficient and environmentally friendly transportation infrastructure. In Indonesia, the AASHTO 1993 method has long been used as the standard guideline for flexible pavement thickness design. However, with the introduction of the 2024 Pavement Design Manual, which is more adaptive to local conditions, a comparative evaluation of the two methods is crucial, especially in supporting sustainable transportation policies. This study aims to analyze how each method contributes to reducing environmental impact, material usage, and energy efficiency. Through an integrative literature review, the study finds that MDP 2024 offers a more efficient pavement design in terms of material and energy usage while supporting carbon emission reductions. Nevertheless, challenges such as the adoption of eco-friendly technologies and the limited availability of geotechnical data still need to be addressed. This study suggests that MDP 2024 be utilized to support more sustainable transportation policies in Indonesia.

Keywords: AASHTO 1993, MDP 2024, sustainable transportation, pavement thickness, environmental impact

1. Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jalan yang berkualitas merupakan kunci utama dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan mobilitas masyarakat di Indonesia. Salah satu komponen kritis dalam infrastruktur jalan adalah desain perkerasan yang bertanggung jawab terhadap ketahanan dan durabilitas jalan terhadap beban lalu lintas. Perkerasan jalan lentur, yang umum digunakan di Indonesia, membutuhkan perencanaan yang tepat untuk menjamin umur layanan jalan serta meminimalisasi biaya perawatan.

AASHTO 1993 telah lama menjadi pedoman standar internasional untuk desain tebal perkerasan jalan lentur. Namun, metode ini didasarkan pada uji empiris yang dilakukan di Amerika Serikat dan sering kali dinilai tidak sesuai dengan kondisi iklim tropis dan geoteknik di Indonesia (Huang, 2004). Di sisi lain, Manual Desain Perkerasan 2024 (MDP 2024) dikembangkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) sebagai standar baru yang disesuaikan dengan kondisi lokal, termasuk curah hujan tinggi, suhu lingkungan, dan karakteristik tanah di berbagai wilayah Indonesia.

Kebijakan transportasi berkelanjutan menjadi salah satu fokus pemerintah dalam beberapa tahun terakhir, yang bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan dampak lingkungan dari pembangunan infrastruktur. Oleh karena itu, desain perkerasan jalan tidak hanya perlu mempertimbangkan aspek teknis seperti ketahanan terhadap beban lalu lintas, tetapi juga aspek lingkungan seperti penggunaan material, emisi karbon, dan efisiensi energi (Zhao dkk., 2021).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja perkerasan jalan lentur berdasarkan AASHTO 1993 dan MDP 2024. (Huang, 2004) dalam bukunya menekankan bahwa AASHTO 1993 menghasilkan ketebalan perkerasan yang lebih konservatif, yang dapat menyebabkan penggunaan material yang berlebihan. (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024) menemukan bahwa MDP 2024 menawarkan desain

Info Makalah:

Dikirim : 10-16-24;

Revisi 1 : 11-12-24;

Diterima : 12-02-24.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : rafi.sugema@student.unjani.ac.id

yang lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan dengan AASHTO 1993. Studi-studi lain, seperti yang dilakukan oleh (Zhao dkk., 2021) dan (Styer dkk., 2024), juga membahas pengaruh teknologi daur ulang dan penggunaan material ramah lingkungan dalam desain perkerasan jalan yang mendukung kebijakan transportasi berkelanjutan.

Meskipun AASHTO 1993 adalah metode yang telah teruji, penerapannya di Indonesia menghadapi tantangan karena perbedaan iklim dan kondisi tanah. MDP 2024 hadir sebagai alternatif yang dirancang khusus untuk kondisi lokal, namun adopsi metode ini belum maksimal di lapangan. Studi ini dibatasi pada analisis perkerasan jalan lentur, dengan fokus pada perbandingan ketebalan perkerasan, penggunaan material, dan dampak lingkungan. Hasil yang diharapkan adalah rekomendasi untuk meningkatkan penerapan MDP 2024 dalam mendukung pembangunan infrastruktur jalan yang berkelanjutan di Indonesia.

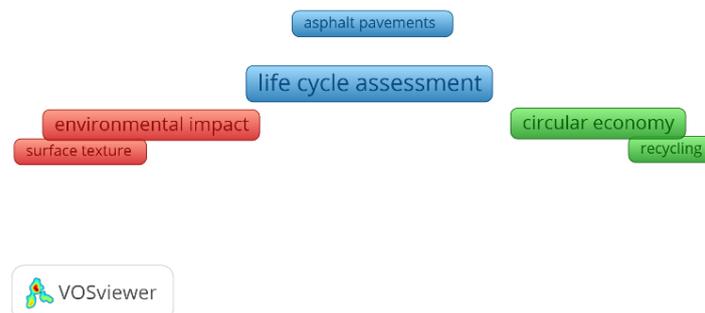
2. Metode

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan analisis kualitatif dan metode *literature review* integratif, yang bertujuan untuk mengevaluasi perbandingan desain tebal perkerasan jalan lentur menggunakan metode AASHTO 1993 dan Manual Desain Perkerasan 2024 (MDP 2024) dalam konteks transportasi berkelanjutan. Selain itu, digunakan juga pendekatan *scientometric* untuk menganalisis tren dan kata kunci utama dari publikasi ilmiah terkait melalui perangkat VOSviewer.

2.2. Analisis Scientometric

Analisis *scientometric* dilakukan untuk mengidentifikasi tren penelitian dan kata kunci yang sering muncul terkait perkerasan jalan lentur, AASHTO 1993, MDP 2024, serta kaitannya dengan kebijakan transportasi berkelanjutan. Data dikumpulkan dari beberapa basis data ilmiah seperti Scopus, Google Scholar, dan Web of Science. *Software* VOSviewer digunakan untuk memvisualisasikan jaringan kata kunci dan kolaborasi antar peneliti.



Gambar 1. Peta Jaringan Kata Kunci dalam Penelitian tentang Desain Perkerasan Jalan Lentur

Hasil dari analisis *scientometric* menunjukkan tiga kata kunci utama yang dominan dalam penelitian ini:

- Circular economy*: Mengacu pada penggunaan kembali material daur ulang, seperti *Recycled Asphalt Pavement* (RAP), yang lebih banyak diterapkan dalam MDP 2024 melalui teknologi seperti *Cold In-Place Recycling* (CIPR), mengurangi material baru dan emisi karbon.
- Environmental impact*: Penilaian dampak lingkungan yang lebih baik pada MDP 2024 dibandingkan AASHTO 1993, khususnya dalam pengurangan material dan energi, serta emisi karbon selama siklus hidup jalan.
- Life cycle assessment* (LCA): Pendekatan yang menilai dampak lingkungan secara keseluruhan dari ekstraksi material hingga pemeliharaan, dengan MDP 2024 lebih unggul dalam mengurangi dampak negatif dibandingkan AASHTO 1993.

2.3. Perkerasan Lentur dan Metode AASHTO 1993

Metode desain perkerasan jalan lentur AASHTO 1993 merupakan salah satu standar perencanaan tebal perkerasan yang banyak digunakan di berbagai negara. Pendekatan ini didasarkan pada hasil AASHO *Road Test* yang dilakukan pada 1950-an, yang mengembangkan hubungan empiris antara beban lalu lintas, kondisi tanah, dan kinerja perkerasan (Huang, 2004). Dalam AASHTO 1993, faktor utama yang diperhitungkan dalam desain perkerasan adalah *Equivalent Single Axle Load* (ESAL), modulus *subgrade*, dan faktor reliabilitas, yang digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan-lapisan perkerasan (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode AASHTO 1993 cenderung menghasilkan desain perkerasan yang lebih tebal karena sifat pendekatan empirisnya, yang tidak sepenuhnya memperhitungkan kondisi iklim dan

tanah lokal (Daba S. Gedafa dkk., 2013). Akibatnya, penggunaan material baru yang lebih besar dapat meningkatkan emisi karbon dan konsumsi energi dalam proses konstruksi dan pemeliharaan jalan.

2.4. Manual Desain Perkerasan 2024 (MDP 2024)

MDP 2024 dikembangkan sebagai pedoman perencanaan tebal perkerasan yang lebih sesuai dengan kondisi tanah dan iklim tropis di Indonesia. Manual ini menggunakan pendekatan mekanistik-empiris, yang memperhitungkan karakteristik tanah dan kondisi lalu lintas yang lebih spesifik dibandingkan metode AASHTO 1993. Salah satu perbedaan utama adalah penggunaan *Modulus Resilient* (MR), yang lebih memperhitungkan pengaruh kelembaban, suhu, dan curah hujan terhadap kinerja perkerasan (El-Ashwah et al., 2021).

Penelitian menunjukkan bahwa MDP 2024 lebih efisien dalam penggunaan material dan energi, serta mampu mengurangi ketebalan perkerasan hingga 20-30% dibandingkan dengan AASHTO 1993. Selain itu, MDP 2024 mendukung penggunaan teknologi *Cold In-Place Recycling* (CIPR) dan material daur ulang lainnya, yang berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon selama siklus hidup jalan (Zhao dkk., 2021).

2.5. Circular Economy dalam Desain Perkerasan

Konsep *circular economy* dalam konstruksi jalan semakin menjadi perhatian penting di era pembangunan berkelanjutan. *Circular economy* berfokus pada penggunaan kembali material dan pengurangan limbah, sehingga meminimalkan penggunaan material baru dan mengurangi dampak lingkungan (Qiao dkk., 2022). Dalam konteks desain perkerasan, material daur ulang seperti *Recycled Asphalt Pavement* (RAP) digunakan untuk mengurangi ketergantungan pada agregat baru dan aspal. Penerapan konsep ini lebih banyak didorong oleh MDP 2024, yang secara khusus mendukung teknologi daur ulang seperti CIPR, dibandingkan AASHTO 1993 yang lebih konvensional dalam pendekatannya (Mubaraki et al., 2019).

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa penerapan *circular economy* dalam perkerasan jalan tidak hanya mengurangi penggunaan material baru, tetapi juga berkontribusi terhadap penghematan energi dan penurunan emisi karbon selama proses konstruksi dan pemeliharaan (Solanki & Zaman, 2017).

2.6. Environmental Impact dan Life Cycle Assessment (LCA)

Dalam konteks keberlanjutan, penilaian *environmental impact* atau dampak lingkungan dari konstruksi jalan lentur menjadi fokus utama penelitian. Dampak lingkungan dapat diukur melalui pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA), yang menilai emisi karbon, penggunaan energi, dan penggunaan material sepanjang siklus hidup suatu infrastruktur, mulai dari ekstraksi bahan mentah hingga perawatan dan daur ulang (El-Ashwah et al., 2021).

Penelitian menunjukkan bahwa AASHTO 1993, karena desain perkerasan yang lebih tebal, cenderung menghasilkan dampak lingkungan yang lebih besar dibandingkan dengan MDP 2024, yang lebih efisien dalam penggunaan material dan energi. Penggunaan material daur ulang dalam MDP 2024 juga berperan penting dalam pengurangan emisi karbon dan penghematan energi sepanjang siklus hidup jalan (Abdollahi dkk., 2023).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perbandingan Tebal Perkerasan Antara AASHTO 1993 dan MDP 2024

AASHTO 1993 dan MDP 2024 menggunakan pendekatan perhitungan yang berbeda. AASHTO 1993 merupakan metode empiris yang didasarkan pada AASHO *Road Test*, yang dikembangkan di Amerika Serikat berdasarkan hasil uji lapangan terhadap beban lalu lintas pada berbagai kondisi tanah dan iklim. Pendekatan ini memperhitungkan modulus *subgrade*, beban lalu lintas, dan reliabilitas dalam menentukan tebal perkerasan. Rumus yang digunakan oleh AASHTO 1993 adalah sebagai berikut:

$$SN = \frac{Z \cdot S_0 \cdot \Delta PSI}{\log_{10}(W_{18}) + \log_{10} \left(1 + \frac{SN^{4,2}}{1094 + 0.42 \cdot Z \cdot S_0} \right)} \quad (1)$$

Pendekatan pada Manual Desain Perkerasan yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, di sisi lain, menggunakan model mekanistik-empiris yang memperhitungkan lebih banyak parameter lokal, seperti *Modulus Resilient* (MR) dari tanah dasar. *Modulus Resilient* ini menggambarkan elastisitas tanah dasar dalam menahan beban kendaraan, yang dipengaruhi oleh kondisi geoteknik dan lingkungan. Rumus perhitungan *Modulus Resilient* yang digunakan dalam MDP 2024 adalah:

$$MR = 1500 \cdot \left(\frac{CBR}{100} \right) \quad (2)$$

Pendekatan ini memungkinkan MDP 2024 untuk mempertimbangkan karakteristik tanah lokal Indonesia, yang sangat berbeda dari Amerika Serikat. MDP 2024 juga dirancang untuk menyesuaikan kondisi iklim tropis, termasuk

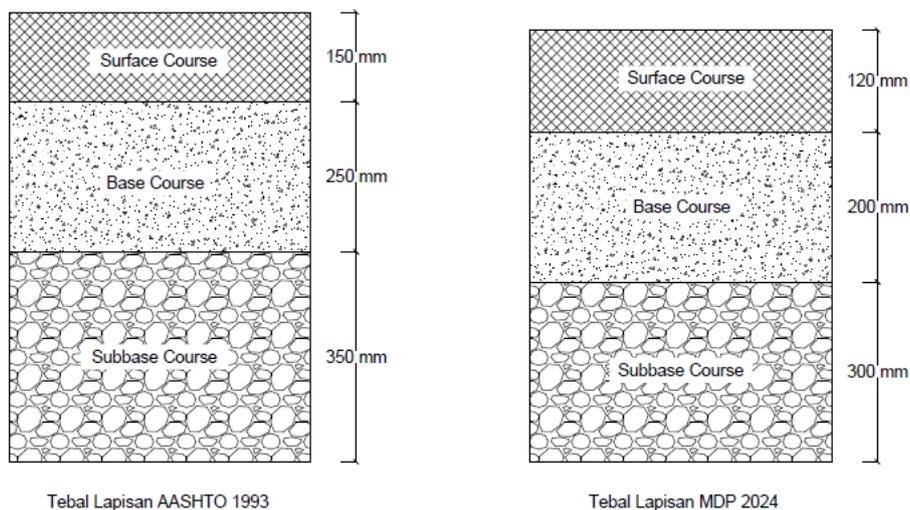
pengaruh kelembaban dan suhu terhadap daya dukung tanah, yang tidak diperhitungkan secara mendetail dalam AASHTO 1993.

Hasil penelitian menunjukkan perbedaan signifikan dalam tebal perkerasan yang dihasilkan oleh kedua metode. Dengan menggunakan parameter yang sama (5 juta ESAL) dan nilai CBR sebesar 6%, hasil perhitungan tebal perkerasan dengan kedua metode ditampilkan pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Perbandingan Tebal Perkerasan Antara AASHTO 1993 dan MDP 2024

Lapisan	AASHTO 1993 (mm)	MDP 2024 (mm)
<i>Surface Course</i>	150	120
<i>Base Course</i>	250	200
<i>Subbase Course</i>	350	300
Total	750	620

Berdasarkan hasil perhitungan di Tabel 1, total tebal perkerasan yang dihasilkan oleh MDP 2024 sebesar 620 mm, atau lebih tipis 17.3% dibandingkan dengan AASHTO 1993, yang menghasilkan tebal perkerasan 750 mm. MDP 2024 secara konsisten menghasilkan tebal perkerasan yang lebih tipis di semua lapisan, baik pada *Surface Course*, *Base Course*, maupun *Subbase Course*.



Gambar 2. Ilustrasi visual dari perbandingan tebal perkerasan antara kedua metode

Penjelasan:

- *Surface Course*: Lapisan teratas dari perkerasan yang berfungsi untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke lapisan yang lebih dalam. Tebal *Surface Course* pada MDP 2024 lebih kecil dibandingkan AASHTO 1993 karena penggunaan Modulus Resilient yang lebih tinggi.
- *Base Course*: Lapisan dasar yang berfungsi untuk menyokong *Surface Course*. MDP 2024 mengurangi tebal lapisan ini karena memperhitungkan kekuatan tanah lokal yang lebih akurat melalui nilai CBR.
- *Subbase Course*: Lapisan subbase yang terletak di antara tanah dasar dan lapisan perkerasan. Pengurangan tebal lapisan ini pada MDP 2024 disebabkan oleh pertimbangan kelembaban dan sifat elastisitas tanah tropis.

3.2. Keunggulan MDP 2024 dalam Penyesuaian dengan Kondisi Lokal

MDP 2024 dirancang khusus untuk memperhitungkan karakteristik geoteknik di Indonesia, yang meliputi tanah dengan daya dukung bervariasi, iklim tropis, dan curah hujan yang tinggi. Hal ini membuat MDP 2024 lebih fleksibel dan akurat dalam menentukan tebal perkerasan jalan. Sementara AASHTO 1993 dikembangkan untuk kondisi Amerika Serikat yang memiliki tanah dan iklim yang sangat berbeda, MDP 2024 memberikan hasil yang lebih efisien dalam konteks Indonesia.

Perbedaan dalam Modulus Resilient (MR) dari subgrade tanah tropis menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan MDP 2024 menghasilkan tebal perkerasan yang lebih tipis. *Modulus Resilient* adalah faktor elastisitas tanah yang dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban, sehingga lebih cocok digunakan di wilayah tropis yang memiliki variasi iklim ekstrem, seperti Indonesia. MDP 2024 secara eksplisit memperhitungkan efek perubahan kelembaban pada daya dukung tanah, sehingga menghasilkan desain perkerasan yang lebih optimal.

Tabel 2. Perbandingan *Modulus Resilient* Antara AASHTO 1993 dan MDP 2024 Berdasarkan CBR

CBR (%)	MR AASHTO 1993 (psi)	MR MDP 2024 (psi)
3	4,500	4,800
5	7,000	7,500
6	8,000	9,000
10	10,500	12,000

Dari Tabel 2, dapat dilihat bahwa MDP 2024 memberikan nilai *Modulus Resilient* yang lebih tinggi untuk setiap nilai CBR, yang menunjukkan bahwa MDP 2024 lebih akurat dalam memperhitungkan elastisitas tanah tropis. Peningkatan MR ini menyebabkan pengurangan tebal perkerasan pada MDP 2024, tanpa mengorbankan kekuatan struktural jalan.

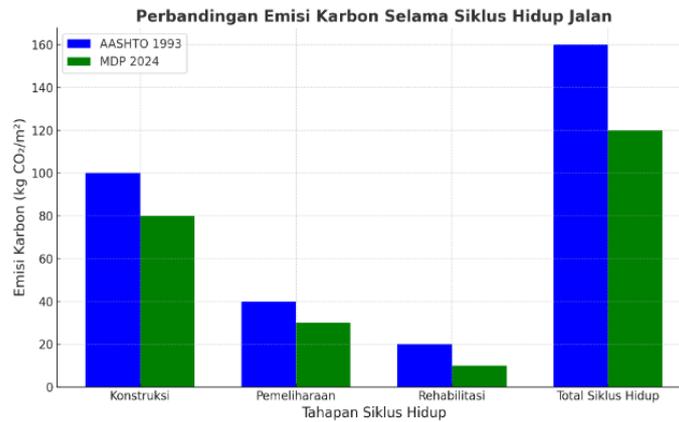
Pengurangan tebal perkerasan yang dihasilkan oleh MDP 2024 memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi konstruksi jalan. Meskipun tebal perkerasan berkurang, desain perkerasan tetap memenuhi syarat kekuatan yang dibutuhkan berdasarkan beban lalu lintas yang direncanakan. Pengurangan sebesar 17.3% tidak hanya menghasilkan desain yang lebih ringan dan cepat dibangun, tetapi juga memberikan manfaat teknis lainnya, seperti:

- a. Peningkatan Durabilitas
Dengan memanfaatkan nilai *Modulus Resilient* yang lebih tinggi, lapisan perkerasan mampu menahan beban lalu lintas dan variasi iklim lebih baik, sehingga meningkatkan durabilitas perkerasan jalan. Dalam konteks tropis dengan kelembaban tinggi dan curah hujan besar, durabilitas lapisan perkerasan sangat penting untuk mengurangi kerusakan dini, seperti retak, deformasi, atau keruntuhan.
- b. Pengurangan Risiko Kerusakan Kelembaban
Tanah tropis sering kali rentan terhadap pengaruh kelembaban tinggi yang dapat menurunkan daya dukung tanah dasar. Karena MDP 2024 memperhitungkan kondisi ini melalui *Modulus Resilient*, desain perkerasan lebih tahan terhadap perubahan kelembaban, sehingga lebih sedikit kerusakan yang disebabkan oleh air yang meresap ke dalam tanah dasar dan lapisan perkerasan.
- c. Optimalisasi Desain untuk Kondisi Lalu Lintas Lokal
Meskipun tebal perkerasan berkurang, MDP 2024 tetap mampu menahan beban lalu lintas berat, terutama di wilayah perkotaan dan jalan tol. Optimalisasi ini mencakup desain perkerasan yang lebih sesuai dengan intensitas lalu lintas di Indonesia, di mana kondisi lalu lintas dan beban kendaraan sering kali berbeda dengan standar yang digunakan di Amerika Serikat.

3.3. Keunggulan MDP 2024 dalam Mendukung Kebijakan Transportasi Berkelanjutan

Salah satu tujuan utama dari penelitian ini adalah mengevaluasi bagaimana MDP 2024 berkontribusi terhadap kebijakan transportasi berkelanjutan di Indonesia. Konsep transportasi berkelanjutan menekankan pada pengurangan dampak lingkungan, penggunaan sumber daya yang efisien, serta peningkatan daya tahan infrastruktur untuk mengurangi biaya pemeliharaan dan memperpanjang umur layanan jalan. MDP 2024 lebih mendukung kebijakan ini dibandingkan dengan AASHTO 1993, terutama karena tiga faktor utama:

- a. Pengurangan tebal perkerasan tanpa mengorbankan kekuatan struktural berarti lebih sedikit material yang diperlukan untuk konstruksi jalan. Hal ini mendukung efisiensi sumber daya, terutama pada lapisan permukaan dan dasar, yang sering kali memerlukan agregat dan material baru yang berbiaya tinggi.
- b. MDP 2024 memperhitungkan kondisi geoteknik dan elastisitas tanah yang lebih akurat, lapisan perkerasan lebih tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh variasi kelembaban, curah hujan, dan suhu ekstrem. Hal ini mengurangi kebutuhan akan pemeliharaan rutin dan rehabilitasi, sehingga menekan emisi dan biaya yang terkait dengan pekerjaan pemeliharaan jalan.
- c. Salah satu tantangan utama dalam pembangunan infrastruktur jalan adalah emisi karbon yang dihasilkan selama proses konstruksi dan pemeliharaan. Dengan pengurangan material dan frekuensi pemeliharaan, MDP 2024 menghasilkan lebih sedikit emisi karbon dibandingkan AASHTO 1993. Berdasarkan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA), MDP 2024 mampu mengurangi emisi karbon hingga 25% selama siklus hidup jalan.



Grafik 1. Perbandingan emisi karbon selama siklus hidup jalan antara kedua metode

Pada grafik 1 di atas memperlihatkan bahwa MDP 2024 menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan AASHTO 1993. Pengurangan emisi karbon ini penting dalam mendukung target net zero emission yang menjadi bagian dari kebijakan lingkungan global, serta sejalan dengan komitmen Indonesia dalam mengurangi emisi gas rumah kaca.

Manual Desain Perkerasan 2024 yang dikeluarkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia menawarkan beberapa keunggulan signifikan dalam mendukung kebijakan transportasi berkelanjutan, terutama terkait pengurangan material, emisi karbon, dan efisiensi energi. Salah satu kontribusi utama adalah kemampuannya untuk mengurangi tebal perkerasan hingga 17,3% yang berdampak pada pengurangan kebutuhan material baru seperti agregat dan aspal. Hal ini mengurangi penggunaan sumber daya alam dan mengurangi energi yang dibutuhkan untuk proses produksi dan pengangkutan material, yang pada gilirannya menekan emisi karbon selama fase konstruksi. Selain pengurangan material, MDP 2024 mendukung penggunaan material daur ulang seperti *Recycled Asphalt Pavement* (RAP). Penggunaan RAP tidak hanya membantu mengurangi limbah konstruksi, tetapi juga berkontribusi pada konsep *circular economy*, di mana material lama diolah kembali untuk digunakan dalam proyek infrastruktur baru. Ini secara langsung mendukung pengurangan jejak karbon dari proyek konstruksi jalan serta mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam baru, sejalan dengan komitmen untuk mencapai *net zero emissions*.

Dari perspektif kebijakan, Manual Desain ini sejalan dengan upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari pembangunan infrastruktur, di mana salah satu tujuannya adalah pengurangan emisi karbon selama siklus hidup jalan. Dengan menggunakan teknologi seperti *Cold In-Place Recycling* (CIPR), MDP 2024 mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan rehabilitasi jalan, yang merupakan fase paling intensif energi dan emisi dalam siklus hidup jalan. Studi menunjukkan bahwa MDP 2024 dapat mengurangi emisi karbon hingga 25% dibandingkan metode tradisional seperti AASHTO 1993, menjadikannya pilihan yang lebih berkelanjutan dalam mendukung pembangunan hijau di Indonesia.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa MDP 2024 lebih efektif daripada AASHTO 1993 dalam desain perkerasan jalan lentur, dengan pengurangan tebal dan emisi karbon. Selain memberikan efisiensi material, MDP 2024 juga lebih cocok untuk kondisi tanah dan iklim tropis Indonesia, yang berperan penting dalam mendukung transportasi berkelanjutan. Penggunaan material daur ulang, seperti *Recycled Asphalt Pavement* (RAP), membantu mengurangi limbah dan emisi, menjadikannya lebih ramah lingkungan dibandingkan AASHTO 1993. Untuk mendukung implementasi MDP 2024, perlu ditingkatkan adopsi teknologi daur ulang seperti *Cold In-Place Recycling* (CIPR) serta perbaikan data geoteknik di berbagai wilayah Indonesia. Pemerintah juga perlu memperkuat kebijakan yang mendukung *circular economy* di sektor konstruksi jalan guna mencapai efisiensi yang lebih besar dalam penggunaan sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk menilai kinerja jangka panjang MDP 2024 dalam berbagai kondisi lalu lintas dan iklim.

Daftar Notasi

- SN = *Structural Number*
- Z = Faktor reliabilitas
- S_o = Standard deviasi variabilitas kondisi jalan.
- ΔPSI = Perbedaan nilai Indeks Kinerja Perkerasan dari awal hingga akhir umur layanan jalan.
- W₁₈ = Total beban lalu lintas kumulatif dalam *Equivalent Single Axle Load* (ESAL).
- MR = *Modulus Resilient*

CBR = *California Bearing Ratio*

ESAL = *Equivalent Single Axle Load*

Daftar Pustaka

- Abdollahi, S. F., Lanotte, M., Kutay, M. E., & Bahia, H. (2023). AASHTO 1993 Plus: an alternative procedure for the calculation of structural asphalt layer coefficients. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2118273>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO 1993*.
- Daba S. Gedafa, Mustaque Hossain, Stefan Romanoschi, & Andrew J. Gisi. (2013). Flexible Pavement Design Simulation Using Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7(11). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2013.11.005>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2024). *Manual Desain Perkerasan 2024*.
- El-Ashwah, A. S., El-Badawy, S. M., & Gabr, A. R. (2021). A Simplified Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design Method for Moderate to Hot Climate Regions. *Sustainability*, 13(19), 10760. <https://doi.org/10.3390/su131910760>
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall.
- Mubaraki, M., Osman, S. A., & Sallam, H. E. M. (2019). Effect of RAP content on flexural behavior and fracture toughness of flexible pavement. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16(3). <https://doi.org/10.1590/1679-78255516>
- Qiao, Y., Wang, Z., Meng, F., Parry, T., Cullen, J., & Liu, S. (2022). Evaluating the economic and environmental impacts of road pavement using an integrated local sensitivity model. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133615>
- Solanki, P., & Zaman, M. (2017). Design of semi-rigid type of flexible pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.10.004>
- Styer, J., Tunstall, L., Landis, A., & Grenfell, J. (2024). Innovations in pavement design and engineering: A 2023 sustainability review. *Heliyon*, 10(13), e33602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33602>
- Zhao, Y., Goulias, D., & Peterson, D. (2021). Recycled Asphalt Pavement Materials in Transport Pavement Infrastructure: Sustainability Analysis & Metrics. *Sustainability*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13148071>