Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
6 (1) 2025, Page: 9626-9633

Analisis Perbandingan Model Kerusakan Perkerasan Lentur Antara MDPJ 2024 Serta ASPHALT Institute Dan AASHTO MEPDG

Kevin Briant Pasaribu [1], Taqia Rahman [2], Latif Budi Suparma [3]

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Transportasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Corresponding Author: Kevin Briant Pasaribu ,, e-mail: kevinbriantpasaribu@mail.ugm.ac.id

Published: February, 2026

ABSTRACT

Flexible pavement plays a critical role in supporting economic growth and connectivity. However, overloading heavy vehicles accelerates structural damage such as fatigue cracking and rutting. This study aims to compare the damage prediction models of the 2024 Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ), Asphalt Institute, and AASHTO MEPDG using KENPAVE simulation across four road classifications in Indonesia. A quantitative descriptive method was employed, analyzing design data from MDPJ 2024, with purposive sampling representing varied traffic loads. KENPAVE software provided horizontal and vertical strain outputs essential for damage calculations via transfer functions of the three models. Results indicated that MDPJ 2024 predicts higher Equivalent Single Axle Load (ESAL) values for fatigue cracking and rutting than international methods, showing optimistic durability estimations. However, differences in permanent deformation predictions, especially compared to AASHTO MEPDG, suggest the need for local calibration. The study concludes that while all models identify fatigue cracking as the dominant failure mode, calibration with field data is essential to validate predictions and optimize pavement design. Future research should focus on empirical validation and environmental factors to improve the national design standards. These findings support enhancing pavement life and cost-efficiency for Indonesia's infrastructure management.

Kata Kunci: Asphalt Institute, Fatigue Cracking, Flexible Pavement, MEPDG, Rutting

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Fenomena Penelitian

Jalan raya berperan penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi, meningkatkan konektivitas wilayah, serta mendukung mobilitas masyarakat di berbagai aspek kehidupan. Namun, peningkatan volume lalu lintas, terutama kendaraan berat dengan muatan berlebih, mempercepat keausan perkerasan lentur melalui kerusakan struktural seperti retak lelah dan deformasi permanen. Fenomena ini semakin menonjol di Indonesia, di mana infrastruktur jalan sering menghadapi beban lalu lintas yang melebihi desain awal, sehingga menimbulkan frekuensi pemeliharaan yang tinggi [Almeida et al., 2021][Miftahulkhair et al., 2024].

Perkerasan lentur terdiri dari lapisan aspal permukaan, fondasi atas dan bawah, serta tanah dasar yang saling mendistribusikan beban kendaraan secara bertahap untuk mengurangi tekanan pada lapisan bawah. Keunggulan perkerasan ini meliputi biaya konstruksi awal yang relatif rendah dibandingkan perkerasan kaku, meskipun rentan terhadap pengaruh lingkungan seperti suhu tinggi. Distribusi beban yang efektif pada lapisan-lapisan ini menjadi kunci ketahanan struktural terhadap beban berulang [Venkat Charyulu & Viswanadh, 2021][Hargiansyah et al., 2025].

Permasalahan Penelitian

Kerusakan utama pada perkerasan lentur mencakup retak lelah yang disebabkan oleh regangan tarik horizontal berulang di dasar lapisan aspal, serta deformasi permanen akibat akumulasi regangan tekan vertikal pada tanah dasar. Retak lelah sering muncul sebagai retakan mikro yang berkembang menjadi retak makro, sementara deformasi permanen membentuk cekungan pada permukaan jalan akibat kombinasi beban berat dan suhu tinggi. Faktor pemicu meliputi desain struktur yang kurang tepat, kualitas material rendah, dan drainase buruk [Hafeez et al., 2013][Hussan et al., 2019].

Overloading kendaraan berat secara signifikan memperpendek umur layanan perkerasan lentur hingga mencapai 50 persen dari rencana desain, dengan peningkatan truck factor hingga 83 persen yang memperburuk kerusakan struktural. Di Indonesia, praktik overloading umum terjadi pada ruas jalan dengan lalu lintas tinggi, menyebabkan kerusakan dini seperti rutting dan fatigue cracking sebelum mencapai umur layanan 20 tahun. Hal ini menuntut evaluasi mendalam terhadap prediksi kerusakan untuk mencegah biaya rehabilitasi berulang [Jihanny, 2021][Setiawan et al., 2024].

Prediksi kerusakan pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan metode internasional seperti Asphalt Institute dan AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), di mana MDPJ cenderung lebih optimis terhadap ESAL sebelum fatigue cracking. Ketidaksesuaian ini terlihat pada simulasi KENPAVE untuk berbagai klasifikasi jalan, dengan Asphalt Institute paling konservatif. Perbedaan model transfer function memerlukan kalibrasi lokal untuk akurasi prediksi di kondisi Indonesia [Rupiani et al., 2023][Panjago, 2024].

Tujuan, Urgensi, dan Kebaruan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja desain perkerasan lentur MDPJ 2024 melalui perbandingan prediksi kerusakan retak lelah dan deformasi permanen dengan model Asphalt Institute serta AASHTO MEPDG menggunakan simulasi KENPAVE pada berbagai klasifikasi jalan. Urgensi penelitian terletak pada kebutuhan kalibrasi MDPJ 2024 dengan data lapangan aktual untuk mengantisipasi overloading dan memperpanjang umur layanan infrastruktur jalan di tengah lalu lintas meningkat. Kebaruan penelitian ini adalah analisis komprehensif perbedaan ESAL antar model pada MDPJ 2024 terbaru, yang memberikan masukan teknis untuk standar desain nasional yang lebih adaptif [Wicaksono & Romadhon, 2025][Aghniya, 2023].

METODE

Jenis dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui simulasi perangkat lunak untuk menganalisis perbandingan model kerusakan perkerasan lentur berdasarkan MDPJ 2024, Asphalt Institute, dan AASHTO MEPDG. Jenis penelitian kuantitatif deskriptif bertujuan untuk memberikan gambaran sistematis tentang fenomena melalui data numerik dan analisis statistik, sesuai dengan definisi Sugiyono yang menekankan pengukuran variabel untuk menggambarkan kondisi aktual tanpa manipulasi eksperimental. Metode ini bersifat hipotetis dengan menganalisis data teknis dari Manual Desain Perkerasan Jalan MDPJ 2024, termasuk struktur perkerasan untuk Jalan Kecil (FFF1-2), Jalan Sedang (FFF1-5), Jalan Raya (FFF1-7), dan Jalan Tol (FFF1-9) menggunakan lapisan fondasi agregat, sebagaimana diuraikan dalam Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2024). Sudaryono menambahkan bahwa pendekatan kuantitatif deskriptif ideal untuk studi simulasi struktural karena memungkinkan pengujian model prediksi secara objektif dengan data input tetap.

Instrumen dan Teknik Analisis Data

Instrumen utama penelitian adalah perangkat lunak KENPAVE dengan modul KENLAYER untuk simulasi respons mekanistik perkerasan lentur, menghasilkan nilai regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_v) pada titik kritis. Data input mencakup tebal lapisan (misalnya, AC-WC 40 mm untuk semua klasifikasi), karakterisasi material seperti modulus

elastisitas (E = 1100-1500 MPa untuk lapisan aspal) dan rasio Poisson (0,35-0,45), serta pembebanan single axle dual tires (SADT) 80 kN dengan tekanan kontak 750 kPa. Teknik analisis data melibatkan fungsi transfer dari tiga model: MDPJ 2024 (Nf = 69180,856 * ε_t^{-1,08} * E_mix^{0,365}), Asphalt Institute (Nf = 0,0796 * ε_t^{-3,291} * E^{-0,854}), dan AASHTO MEPDG (Nf-HMA = k_f1 * C * Ch * f1 * ε_t^{k_f2} * f2 * E^{k_f3}), dihitung manual dari output KENPAVE untuk memprediksi ESAL hingga fatigue cracking dan rutting. Emzir menjelaskan bahwa instrumen simulasi seperti KENPAVE memfasilitasi analisis data numerik yang akurat melalui pengolahan layered elastic model, sementara Creswell menekankan integrasi transfer functions untuk validasi prediksi kerusakan.

Populasi dan Sampel

Populasi penelitian terdiri dari seluruh desain struktur perkerasan lentur aspal dengan fondasi agregat menurut MDPJ 2024 untuk empat klasifikasi jalan utama di Indonesia: FFF1-2 (Jalan Kecil), FFF1-5 (Jalan Sedang), FFF1-7 (Jalan Raya), dan FFF1-9 (Jalan Tol). Sampel dipilih secara purposive dengan kriteria lengkap data tebal lapisan, material, dan pembebanan dari MDPJ 2024, sehingga keempat klasifikasi tersebut menjadi unit analisis representatif untuk berbagai tingkat lalu lintas. Pemilihan purposive ini sesuai Sugiyono, yang menyatakan bahwa sampel nonprobability efektif untuk studi deskriptif hipotetis di mana populasi terdefinisi oleh standar teknis nasional, memastikan generalisasi ke kondisi perkerasan Indonesia. Sudaryono menambahkan bahwa sampel berdasarkan klasifikasi fungsional jalan mencakup variabilitas beban ESAL secara komprehensif.

Prosedur Penelitian

Prosedur dimulai dengan pengumpulan data desain dari MDPJ 2024, diikuti simulasi KENLAYER melalui tahapan LAYERINP (input lapisan), General (parameter global), Zcoord (kedalaman kritis), Layer (sifat material), Moduli (modulus), dan Load (pembebanan SADT), kemudian running untuk output ε_t (bawah AC) dan ε_v (atas subgrade). Nilai regangan dianalisis dengan persamaan kerusakan ketiga model untuk menghitung ESAL fatigue (Nf) dan rutting (Nd), direkapitulasi per klasifikasi jalan, dan dibandingkan tren dominansi kerusakan. Proses ini diakhiri validasi konsistensi prediksi, dengan fatigue cracking sebagai kerusakan utama (ESAL terendah Asphalt Institute: 156.304 untuk FFF1-2). Creswell menguraikan prosedur bertahap ini sebagai mixed mechanistic-empirical workflow yang logis untuk research design simulasi, sementara Emzir menyoroti urutan sistematis input-output untuk reliabilitas analisis data.

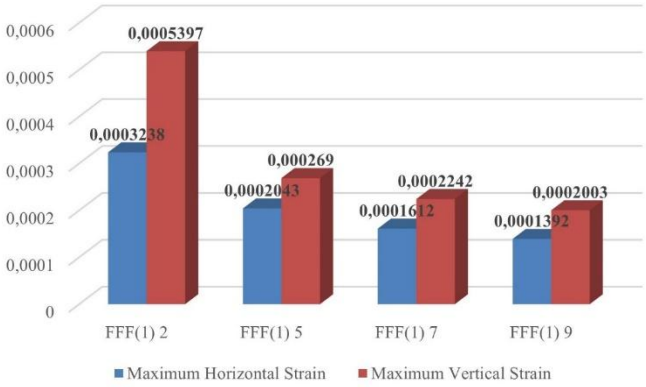
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis *Horizontal Strain* dan *Vertical Strain* menggunakan KENPAVE

Berdasarkan analisis yang dilakukan pada empat klasifikasi jalan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, yaitu FFF(1) 2 (jalan kecil), FFF(1) 5 (jalan sedang), FFF(1) 7 (jalan raya), dan FFF(1) 9 (jalan tol) menggunakan perangkat lunak KENPAVE, diperoleh nilai regangan tarik (*horizontal strain*) dan regangan tekan (*vertical strain*) pada tiap klasifikasi jalan yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1

Tabel 1. Rekapitulasi Nilai *Maximum Horizontal Strain* dan *Maximum Vertical Strain* (Penulis, 2025)

Klasifikasi Jalan	***Maximum Horizontal Strain***	***Maximum Vertical Strain***
FFF(1) 2	0,0003238	0,0005397
FFF(1) 5	0,0002043	0,0002690
FFF(1) 7	0,0001612	0,0002242
FFF(1) 9	0,0001392	0,0002003



Gambar 1. Grafik Perbandingan *Maximum Horizontal Strain* dan *Maximum Vertical Strain* (Penulis, 2025)

Hasil simulasi KENPAVE pada Tabel 1 menunjukkan tren penurunan nilai regangan yang konsisten seiring dengan meningkatnya klasifikasi jalan. Nilai maximum horizontal strain menurun dari 0,0003238 pada FFF(1) 2 (Jalan Kecil) menjadi 0,0001392 pada FFF(1) 9 (Jalan Tol), atau mengalami penurunan sebesar 57%. Sementara itu, maximum vertical strain turun dari 0,0005397 pada FFF(1) 2 (Jalan Kecil) menjadi 0,0002003 pada FFF(1) 9 (Jalan Tol), atau mengalami penurunan yang lebih signifikan sebesar 63%. Hal ini menunjukkan bahwa struktur perkerasan untuk klasifikasi jalan yang lebih tinggi dirancang memiliki kekakuan dan ketebalan yang lebih baik. Regangan yang lebih kecil mengindikasikan distribusi beban yang lebih efektif melalui lapisan perkerasan ke tanah dasar.

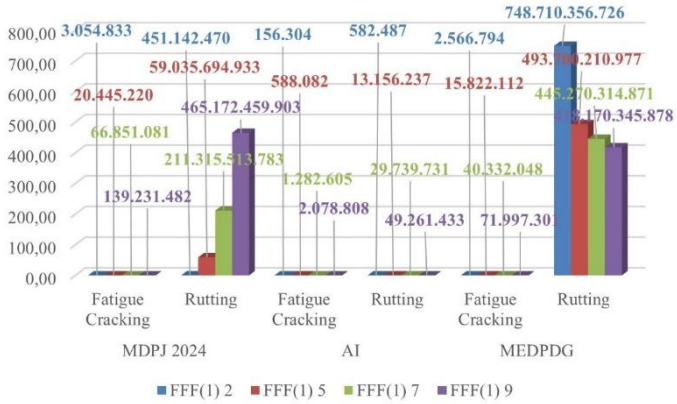
2. Analisis Kerusakan Retak Lelah (*Fatigue Cracking*) dan Deformasi Permanen (*Rutting*) Berdasarkan MDPJ 2024, AI, dan AASHTO MEPDG

Hasil *output* dari program KENPAVE berupa nilai regangan tarik maksimum (*maximum horizontal strain*) dan regangan tekan maksimum (*maximum vertical strain*) pada tiap klasifikasi jalan. Nilai-nilai tersebut kemudian dimanfaatkan untuk menganalisis respon struktur perkerasan lentur dalam memprediksi jumlah repetisi izin beban (ESAL) yang dapat ditahan perkerasan FFF(1) 2 (Jalan Kecil), FFF(1) 5 (Jalan Sedang), FFF(1) 7 (Jalan Raya), dan FFF(1) 9 (Jalan Tol) terhadap potensi kerusakan, khususnya retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*) menggunakan persamaan model kerusakan retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*) berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, Asphalt Institute, dan AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design dengan menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2, Persamaan 3, Persamaan 4, Persamaan 5, dan Persamaan 9. Rekapitulasi nilai jumlah repetisi izin beban (ESAL) yang diperoleh dari hasil analisis kerusakan retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*) pada empat klasifikasi jalan, berdasarkan pendekatan model kerusakan antara Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, Asphalt Institute, dan AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Nilai Jumlah Repetisi izin Beban (ESAL) (Penulis, 2025)

Klasifikasi Jalan	MDPJ 2024		Asphalt Institute		AASHTO MEPDG	
	Retak Lelah (*Fatigue Cracking*)	Deformasi Permanen (*Rutting*)	Retak Lelah (*Fatigue Cracking*)	Deformasi Permanen (*Rutting*)	Retak Lelah (*Fatigue Cracking*)	Deformasi Permanen (*Rutting*)
FFF(1) 2	3.054.833 ESAL	451.142.470 ESAL	156.304 ESAL	582.487 ESAL	2.566.794 ESAL	748.710.356.726 ESAL
FFF(1) 5	20.445.220 ESAL	59.035.694.933 ESAL	588.082 ESAL	13.156.237 ESAL	15.822.112 ESAL	493.700.210.977 ESAL
FFF(1) 7	66.851.081	211.315.513.783	1.282.605	29.739.731	40.332.048	445.270.314.871

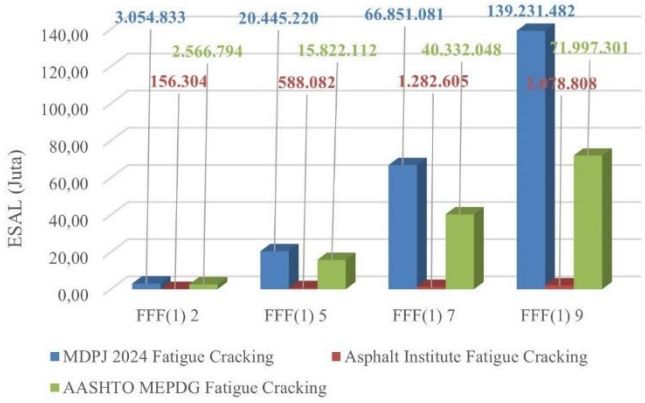
	ESAL	ESAL	ESAL	ESAL	ESAL	ESAL
FFF(1) 9	139.231.482	465.172.459.903	2.078.808	49.261.433	71.997.301	418.170.345.878
	ESAL	ESAL	ESAL	ESAL	ESAL	ESAL



Gambar 2. Grafik Nilai Jumlah Repetisi Izin Beban (ESAL) (Penulis, 2025)

Temuan Utama

Pada Tabel 8 serta visualisasi dalam Gambar 3, terlihat adanya variasi jumlah repetisi izin beban (ESAL) terhadap dua jenis kerusakan utama pada perkerasan lentur, yaitu retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*) dengan membandingkan pendekatan model kerusakan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, Asphalt Institute, dan AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design. Ketiga metode tersebut konsisten dalam memprediksi retak lelah (*fatigue cracking*) sebagai kerusakan struktural utama yang terjadi paling cepat. Untuk mempermudah analisis visual, perbandingan ini disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Nilai ESAL *Fatigue Cracking*

Berdasarkan hasil analisis, terlihat bahwa ketebalan perkerasan yang didesain menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 menghasilkan nilai ESAL yang berbeda signifikan ketika dievaluasi dengan dua metode internasional, yaitu Asphalt Institute dan AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design. Namun, ketiga metode secara konsisten sepakat dalam memprediksi retak lelah (*fatigue cracking*) sebagai kerusakan dominan di semua klasifikasi jalan. Nilai ESAL untuk retak lelah (*fatigue cracking*) pada MDPJ 2024 secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan kedua metode lainnya, yaitu Asphalt Institute dan AASHTO MEPDG untuk semua klasifikasi jalan. Hal ini mengindikasikan bahwa MDPJ 2024 justru paling optimis terhadap kerusakan retak lelah (*fatigue cracking*) dibandingkan kedua metode internasional, karena menghasilkan nilai ESAL yang secara konsisten lebih tinggi untuk semua klasifikasi jalan. Sementara untuk deformasi permanen (*rutting*), nilai ESAL MDPJ 2024 selalu lebih besar dibandingkan Asphalt Institute,

menunjukkan tingkat optimisme yang lebih tinggi terhadap kerusakan ini. Namun, bila dibandingkan dengan AASHTO MEPDG, nilai ESAL MDPJ 2024 untuk deformasi permanen (*rutting*) lebih kecil pada FFF(1) 2 (Jalan Kecil), FFF(1) 5 (Jalan Sedang), dan FFF(1) 7 (Jalan Raya), tetapi justru lebih besar pada FFF(1) 9 (Jalan Tol). Kondisi ini menimbulkan pertanyaan apakah desain tebal perkerasan pada MDPJ 2024 yang dihasilkan sudah optimal atau justru berlebihan, ataukah formulasi persamaan kerusakan retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*) dalam MDPJ 2024 sudah terkalibrasi dengan baik untuk kondisi lapangan di Indonesia.

Di sisi lain, perbedaan yang signifikan dengan hasil proyeksi AASHTO MEPDG memunculkan wacana mengenai kelayakan penerapan metode yang memiliki kompleksitas tinggi dan kebutuhan data yang sangat detail tersebut di Indonesia. Keberhasilan penerapan AASHTO MEPDG sangat bergantung pada ketersediaan data dan proses kalibrasi lokal yang komprehensif. Tanpa itu, akurasi dan reliabilitas hasil prediksinya untuk kondisi Indonesia dapat dipertanyakan.

Mengingat penelitian ini masih bersifat *hypothetical* dan belum diuji dengan studi kasus langsung, hasil analisis ini diharapkan dapat menjadi jembatan bagi penelitian selanjutnya. Penelitian lanjutan yang menguji performa perkerasan yang didesain dengan MDPJ 2024 dengan data monitoring lapangan secara langsung sangat diperlukan. Data umur layan aktual dan jenis kerusakan yang muncul tersebut kemudian dapat digunakan untuk memvalidasi keakuratan prediksi dari ketiga model, melakukan kalibrasi intensif terhadap parameter-parameter kunci dalam setiap model, serta menentukan model mana yang paling representatif atau menghasilkan faktor konversi antar prediksi ketiga model untuk kondisi Indonesia. Dengan demikian, standar desain nasional dapat terus disempurnakan agar lebih adaptif terhadap tantangan kondisi jalan di Indonesia sekaligus selaras dengan perkembangan metode internasional.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam prediksi kerusakan perkerasan lentur antara model Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, Asphalt Institute, dan AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Ketiga model konsisten menyatakan bahwa retak lelah merupakan jenis kerusakan utama yang muncul paling awal pada perkerasan lentur. MDPJ 2024 menunjukkan nilai ESAL yang lebih tinggi secara konsisten untuk retak lelah dan deformasi permanen dibandingkan dua metode internasional, menunjukkan optimisme yang lebih besar terhadap ketahanan perkerasan. Sementara itu, perbedaan nilai ESAL deformasi permanen antara MDPJ 2024 dan AASHTO MEPDG di beberapa klasifikasi jalan menimbulkan pertanyaan mengenai kecukupan kalibrasi model MDPJ 2024 untuk kondisi nyata di Indonesia. Hal ini menandakan perlunya evaluasi lebih mendalam terhadap formulasi dan ketebalan perkerasan yang dihasilkan agar standar desain nasional menjadi lebih sesuai dengan kondisi lapangan.

Keterbatasan penelitian terletak pada nature-nya yang masih hipotetik dan bergantung pada simulasi perangkat lunak tanpa validasi data monitoring lapangan secara langsung. Oleh karena itu, disarankan untuk penelitian selanjutnya melakukan studi empiris dengan data performa perkerasan riil agar validitas dan akurasi prediksi model dapat diuji dan dikalibrasi ulang. Penelitian lanjutan juga penting untuk mengkaji pengaruh variabel lingkungan dan material lokal terhadap model prediksi kerusakan. Dari sisi praktis, penelitian ini menekankan kebutuhan pembaruan dan kalibrasi standar desain perkerasan nasional yang lebih adaptif agar mampu menghadapi tantangan peningkatan beban lalu lintas dan praktik overloading kendaraan berat di Indonesia. Dengan pembaruan ini, diharapkan manajemen dan pemeliharaan infrastruktur jalan dapat lebih efektif dan berkelanjutan, memperpanjang umur layanan dan menekan biaya rehabilitasi.

REFERENSI

AASHTO. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Aghniya, N. (2023). Evaluasi kondisi perkerasan dengan metode Pavement Condition Index (PCI) dan metode mekanistik-empirik pada Jalan Kapten Haryadi, Sleman [Undergraduate thesis, Universitas Islam Indonesia]. Repositori Universitas Islam Indonesia. **https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/46709**

Almeida, A., Moreira, J. J. M., Silva, J. P., & Viteri, C. G. V. (2021). Impact of traffic loads on flexible pavements considering Ecuador's traffic and pavement condition. *International Journal of Pavement Engineering, 22*(6), 700–707. **https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1640362**

Banerjee, S., Manna, B., & Shahu, J. T. (2024). Experimental investigation of the geometry of geocell on the performance of flexible pavement under repeated loading. *Geotextiles and Geomembranes, 52*(4), 654–670. **https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.03.007**

Bennert, T., Maher, A., & Gucunski, N. (2014). Calibration of MEPDG fatigue models for asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering, 15*(2), 165–175. **https://doi.org/10.1080/10298436.2012.748390**

Ceylan, H., Schwartz, C. W., & Kim, S. (2009). Development of MEPDG permanent deformation models for subgrade soils. *Transportation Research Record, 2101*(1), 61–70. **https://doi.org/10.3141/2101-07**

Hadiwardoyo, S. P., Sumabrata, R. J., & Berawi, M. A. (2012). Tolerance limit for trucks with excess load in transport regulation in Indonesia. *MAKARA of Technology Series, 16*(1). **https://doi.org/10.7454/mst.v16i1.1336**

Hafeez, I., Kamal, M. A., Mirza, M. W., Barkatullah, & Bilal, S. (2013). Laboratory fatigue performance evaluation of different field laid asphalt mixtures. *Construction and Building Materials, 44*, 792–797. **https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.083**

Hussan, S., Kamal, M. A., Hafeez, I., Farooq, D., Ahmad, N., & Khanzada, S. (2019). Statistical evaluation of factors affecting the laboratory rutting susceptibility of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering, 20*(4), 402–416. **https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1299527**

Jihanny, J. (2021). The overload impact on design life of flexible pavement. *International Journal of GEOMATE, 20*(78). **https://doi.org/10.21660/2021.78.j2020**

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2024). *Manual desain perkerasan jalan, No. 03/M/BM/2024*. Direktorat Jenderal Bina Marga.

Li, R., Schwartz, C. W., & Gibson, N. (2016). Probabilistic implementation of the MEPDG for flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering, 142*(3), 04015065. **https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000827**

Panjago, F. (2024). Evaluasi kerusakan jalan dan kinerja jalan menggunakan program Kenpave dengan permodelan elastik dan viskoelastik pada ruas jalan Klangon-Tempel Yogyakarta [Undergraduate thesis, Universitas Islam Indonesia]. Repositori Universitas Islam Indonesia. **https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/52203**

Rupiani, M., Subagio, B. S., & Hariyadi, E. S. (2023). Analisis perbandingan tebal lapis tambah perkerasan lentur menggunakan metode MEPDG 2015 dan metode Asphalt Institute 1982 studi kasus: Bts. Kota Cirebon – Losari (Bts. Prov. Jateng) [Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung]. Digilib ITB. **https://digilib.itb.ac.id/gdl/read/240782**

Simanjuntak, I. (2014). Evaluasi tebal lapis perkerasan lentur Manual Desain Perkerasan Jalan No.22.2/KPTS/Db/2012 dengan menggunakan program KENPAVE.

Skrzypczak, I., Radwański, W., & Pytlowany, T. (2018). Durability vs technical—The usage properties of road pavements. *E3S Web of Conferences, 45*, 00082. **https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500082**

The Asphalt Institute. (1982). *Thickness design—Asphalt pavements for highways and streets* (MS-1, 9th ed.). The Asphalt Institute.

Venkat Charyulu, S., & Viswanadh, G. K. (2021). Flexible pavement design of district road. *E3S*

Web of Conferences, 309, 01210. **https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901210**

Wayne, M., Boudreau, R. L., & Kwon, J. (2011). Characterization of mechanically stabilized layer by resilient modulus and permanent deformation testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2204*(1), 76–82. **https://doi.org/10.3141/2204-10**

Wicaksono, M. C., & Romadhon, A. (2025). Analisis kerusakan jalan menggunakan program KENPAVE (Studi kasus: JL Godong – Penawangan Kabupaten Grobogan, Provinsi Jawa Tengah) [Laporan Tugas Akhir, Universitas Semarang]. ESkripsi USM. **https://eskripsi.usm.ac.id/file-C11A-70014.html**