



Homepage Journal: <https://jurnal.unismuhpalu.ac.id/index.php/JKS>

Tinjauan Sistematis Penerapan Metode Mekanistik-Empiris Pada Perencanaan Perkerasan Lentur di Indonesia

A Systematic Review of the Application of the Mechanistic-Empirical Method in Flexible Pavement Design in Indonesia

Hasanuddin

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Palu

*Corresponding Author: hasanuddin131@gmail.com

Artikel Review

Article History:

Received: 15 Jun, 2026

Revised: 29 Jul, 2026

Accepted: 20 Aug, 2026

Kata Kunci:

Metode Mekanistik-Empiris;
Perkerasan Lentur; Kinerja
Perkerasan; Fatigue Cracking;
Rutting; Systematic Literature
Review; PRISMA; Indonesia

Keywords:

*Mechanistic-Empirical Method;
Flexible Pavement; Pavement
Performance; Fatigue Cracking;
Rutting; Systematic Literature
Review; PRISMA; Indonesia*

DOI: [10.56338/jks.v9i8.12074](https://doi.org/10.56338/jks.v9i8.12074)

ABSTRAK

Pendekatan mekanistik-empiris (Mechanistic-Empirical/M-E) semakin banyak diterapkan dalam rekayasa perkerasan karena mampu memberikan kerangka analisis yang lebih rasional dalam memprediksi kinerja perkerasan berdasarkan karakteristik material, beban lalu lintas, dan kondisi lingkungan. Namun, penerapannya pada perkerasan lentur di Indonesia masih menghadapi berbagai keterbatasan, terutama terkait ketersediaan basis data material, karakteristik lalu lintas, serta kebutuhan kalibrasi dan validasi terhadap kondisi lokal. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan sistematis terhadap penerapan, kinerja, dan tantangan metode mekanistik-empiris pada perkerasan lentur di Indonesia. Penelitian menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dengan mengikuti kerangka Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Sebanyak 25 artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2015–2025 diidentifikasi, diseleksi, dan dianalisis berdasarkan pendekatan metodologis, indikator kinerja perkerasan, serta kendala penerapannya. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode M-E secara umum memberikan prediksi yang lebih akurat dan andal terhadap kerusakan fatigue cracking dan rutting dibandingkan pendekatan empiris, terutama karena mampu mempertimbangkan pengaruh beban lalu lintas, karakteristik material, dan kondisi lingkungan secara lebih komprehensif. Namun, penerapan metode M-E di Indonesia masih terkendala oleh keterbatasan data material dan lalu lintas yang representatif, variasi kondisi perkerasan, serta belum optimalnya proses kalibrasi dan validasi berbasis kondisi lokal. Temuan ini menegaskan pentingnya pengembangan basis data perkerasan nasional dan model kinerja yang dikalibrasi secara lokal untuk meningkatkan keandalan desain perkerasan berbasis mekanistik-empiris di Indonesia. Penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada penguatan pemantauan kinerja perkerasan jangka panjang, integrasi data lalu lintas dan iklim, serta pengembangan prosedur kalibrasi lokal yang terstandar guna mendukung desain perkerasan lentur yang lebih akurat, berkelanjutan, dan sesuai dengan karakteristik Indonesia.

ABSTRACT

The Mechanistic-Empirical (M-E) approach is increasingly adopted in pavement engineering because it offers a more rational analytical framework for predicting pavement performance based on material characteristics, traffic loads, and environmental conditions. However, its application to flexible pavements in Indonesia faces various limitations, particularly regarding the availability of material and traffic data, as well as the need for calibration and validation against local conditions. This study aims to conduct a systematic review of the application, performance, and challenges of the M-E method for flexible pavements in Indonesia. A Systematic Literature Review (SLR) approach was employed, adhering to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework. Twenty-five scientific articles published between 2015 and 2025 were identified, selected, and analyzed based on methodological approaches, pavement performance indicators, and implementation constraints. The review indicates

that the M-E method generally yields more accurate and reliable predictions of fatigue cracking and rutting compared to empirical approaches, primarily due to its ability to comprehensively account for the effects of traffic loads, material properties, and environmental conditions. Nevertheless, the implementation of the M-E method in Indonesia remains hindered by a lack of representative material and traffic data, variations in pavement conditions, and suboptimal calibration and validation processes tailored to local contexts. These findings underscore the importance of developing a national pavement database and locally calibrated performance models to enhance the reliability of M-E-based pavement design in Indonesia. Future research should focus on strengthening long-term pavement performance monitoring, integrating traffic and climate data, and developing standardized local calibration procedures to support flexible pavement designs that are more accurate, sustainable, and suited to Indonesian conditions.

PENDAHULUAN

Perkerasan lentur merupakan salah satu komponen utama infrastruktur transportasi yang berperan penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi barang. Kinerja perkerasan sangat dipengaruhi oleh interaksi antara beban lalu lintas, karakteristik material, kondisi lingkungan, serta struktur lapisan perkerasan. Oleh karena itu, pemilihan metode desain yang mampu merepresentasikan respons perkerasan terhadap berbagai kondisi pembebanan menjadi aspek penting dalam menghasilkan desain yang aman, ekonomis, dan berkelanjutan. Secara umum, pendekatan desain perkerasan dapat diklasifikasikan menjadi pendekatan empiris dan pendekatan mekanistik-empiris (Mechanistic-Empirical/M-E).

Pendekatan empiris pada dasarnya menggunakan hubungan statistik antara parameter desain, seperti beban lalu lintas dan karakteristik perkerasan, dengan tingkat kerusakan yang diamati berdasarkan data historis. Pendekatan ini memiliki keunggulan dalam kesederhanaan penerapan karena hubungan antara variabel desain dan kinerja perkerasan dapat diperoleh dari pengalaman lapangan. Namun, model empiris memiliki keterbatasan dalam menjelaskan mekanisme fisik yang mendasari terjadinya kerusakan perkerasan. Ketergantungan yang tinggi terhadap kondisi lokasi dan basis data historis menyebabkan model empiris memiliki kemampuan generalisasi yang terbatas ketika diterapkan pada kondisi material, lalu lintas, iklim, dan lingkungan yang berbeda. Keterbatasan tersebut dapat menghasilkan desain yang terlalu konservatif (overdesign) atau sebaliknya kurang mampu merepresentasikan kondisi aktual di lapangan (Huang, 2004; AASHTO, 2008).

Sebagai pengembangan dari pendekatan empiris, metode mekanistik-empiris mengintegrasikan prinsip mekanika material dan struktur dengan model empiris kinerja perkerasan. Pendekatan mekanistik digunakan untuk menghitung respons struktural akibat beban lalu lintas dan lingkungan, sedangkan hubungan empiris digunakan untuk menghubungkan respons tersebut dengan perkembangan kerusakan berdasarkan data hasil pengamatan lapangan. Dalam desain perkerasan lentur, respons struktural yang umum dianalisis antara lain regangan tarik horizontal pada bagian bawah lapisan beraspal yang berkaitan dengan perkembangan fatigue cracking serta regangan tekan vertikal pada tanah dasar yang berhubungan dengan perkembangan rutting. Integrasi kedua pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi kinerja perkerasan dilakukan secara lebih komprehensif dibandingkan metode empiris konvensional (NCHRP, 2004; ARA, Inc., 2004).

Perkembangan metode M-E juga didorong oleh kebutuhan untuk menghasilkan desain perkerasan yang lebih responsif terhadap variasi beban lalu lintas, sifat material, dan kondisi lingkungan. Model M-E memungkinkan proses desain mempertimbangkan karakteristik material secara lebih rinci, distribusi beban lalu lintas, temperatur, kelembapan, serta perubahan respons struktur selama masa layan. Dengan demikian, metode ini berpotensi meningkatkan akurasi prediksi kerusakan dan membantu menentukan strategi desain serta pemeliharaan berdasarkan kinerja yang diharapkan. Namun, keandalan metode M-E sangat bergantung pada kualitas data input, kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi lokal, serta proses kalibrasi dan validasi model terhadap data lapangan (NCHRP, 2004; AASHTO, 2020).

Dalam konteks Indonesia, kebutuhan terhadap pendekatan desain yang mampu mengakomodasi keragaman kondisi lalu lintas, iklim, material, dan karakteristik tanah dasar menjadi semakin penting. Konsep mekanistik-empiris telah mulai diakomodasi dalam pengembangan pedoman

desain perkerasan jalan nasional melalui Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ). Pedoman tersebut menunjukkan adanya pergeseran menuju pendekatan desain yang mempertimbangkan respons struktural dan prediksi kinerja perkerasan. Meskipun demikian, penerapan pendekatan M-E di Indonesia masih menghadapi tantangan, terutama berkaitan dengan ketersediaan data material lokal, karakteristik lalu lintas, kondisi iklim, data kinerja jangka panjang, serta kebutuhan kalibrasi model agar sesuai dengan karakteristik perkerasan di berbagai wilayah Indonesia (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017).

Sejumlah penelitian telah mengevaluasi penggunaan metode mekanistik-empiris untuk memprediksi kerusakan perkerasan, khususnya fatigue cracking dan rutting. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada aspek atau lokasi tertentu, sehingga temuan yang tersedia belum sepenuhnya memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan penerapan M-E di Indonesia. Selain itu, masih terdapat variasi dalam parameter yang digunakan, jenis material, metode pemodelan, indikator kinerja, serta tingkat kalibrasi model yang diterapkan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya research gap berupa belum tersedianya sintesis sistematis yang mengintegrasikan perkembangan penelitian, parameter utama, hasil prediksi, keunggulan, keterbatasan, serta kebutuhan penelitian lanjutan terkait metode M-E pada perkerasan lentur di Indonesia.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dengan kerangka Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) untuk memetakan perkembangan penelitian metode mekanistik-empiris pada perkerasan lentur di Indonesia selama periode 2015–2025. Pendekatan sistematis ini memungkinkan hasil penelitian terdahulu diidentifikasi, diklasifikasikan, dan disintesis berdasarkan karakteristik metodologi, parameter mekanistik, indikator kerusakan, serta hasil penerapannya. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya merangkum perkembangan literatur, tetapi juga mengidentifikasi pola penelitian, keterbatasan metodologis, dan kesenjangan pengetahuan yang masih perlu dikaji.

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi dan memetakan perkembangan penerapan metode mekanistik-empiris pada perkerasan lentur di Indonesia selama periode 2015–2025; (2) menganalisis parameter mekanistik, model kerusakan, karakteristik material, dan hasil prediksi yang digunakan dalam penelitian terdahulu; serta (3) mengidentifikasi keunggulan, keterbatasan, dan research gap sebagai dasar untuk pengembangan penelitian dan penerapan metode M-E yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi lokal Indonesia. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi akademik melalui sintesis perkembangan pengetahuan mengenai M-E sekaligus memberikan implikasi praktis bagi pengembangan desain perkerasan berbasis kinerja di Indonesia.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dengan kerangka Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti ilmiah mengenai penerapan metode mekanistik-empiris (Mechanistic-Empirical/M-E) pada perkerasan lentur di Indonesia. Penggunaan pendekatan SLR dipilih karena memungkinkan proses identifikasi dan seleksi literatur dilakukan secara sistematis, transparan, dan dapat direplikasi, sekaligus mengurangi potensi bias dalam pemilihan sumber penelitian (Page et al., 2021).

Strategi Pencarian Literatur

Proses pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data, yaitu Scopus, Google Scholar, dan Garuda, dengan rentang publikasi tahun 2015–2025. Pemilihan ketiga basis data tersebut dimaksudkan untuk memperoleh cakupan literatur yang luas, baik dari publikasi internasional yang terindeks Scopus maupun penelitian nasional yang relevan dengan konteks penerapan metode M-E di Indonesia. Kata kunci pencarian disusun berdasarkan kombinasi istilah yang berkaitan dengan metode, objek penelitian, dan jenis kerusakan perkerasan, antara lain “mechanistic-empirical”, “mechanistic empirical pavement”, “flexible pavement”, “fatigue cracking”, “rutting”, “pavement design”, dan “Indonesia”. Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean AND dan OR untuk meningkatkan relevansi hasil pencarian.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan sebelum proses analisis. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel diterbitkan pada periode 2015–2025; (2) membahas metode mekanistik-empiris atau penerapannya dalam desain dan evaluasi perkerasan lentur; (3) memiliki relevansi dengan kondisi, data, material, atau studi kasus di Indonesia; (4) artikel tersedia dalam bentuk teks lengkap; dan (5) memuat informasi metodologis dan/atau hasil penelitian yang dapat dianalisis. Sementara itu, literatur dikeluarkan apabila (1) tidak berkaitan dengan perkerasan lentur atau metode M-E; (2) merupakan artikel duplikat; (3) tidak tersedia dalam teks lengkap; (4) berupa opini, berita, atau dokumen nonilmiah yang tidak memenuhi tujuan kajian; atau (5) tidak memberikan informasi yang memadai untuk proses sintesis.

Prosedur Seleksi Literatur

Seleksi literatur dilakukan melalui beberapa tahapan sesuai dengan kerangka PRISMA, yaitu identification, screening, eligibility, dan inclusion. Pada tahap identification, seluruh artikel yang diperoleh dari Scopus, Google Scholar, dan Garuda dikumpulkan berdasarkan kombinasi kata kunci yang telah ditentukan. Selanjutnya, artikel duplikat diidentifikasi dan dihapus. Pada tahap screening, judul dan abstrak setiap artikel diperiksa untuk menilai kesesuaiannya dengan fokus penelitian. Artikel yang tidak relevan dikeluarkan dari proses selanjutnya.

Tahap berikutnya adalah eligibility, yaitu pemeriksaan teks lengkap terhadap artikel yang lolos tahap screening. Pada tahap ini, artikel dievaluasi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Artikel yang memenuhi seluruh kriteria kemudian dimasukkan ke dalam tahap inclusion. Berdasarkan keseluruhan proses seleksi tersebut, diperoleh 25 artikel yang memenuhi kriteria dan selanjutnya digunakan sebagai sumber utama dalam analisis dan sintesis penelitian.

Tahapan PRISMA

Secara sistematis, tahapan seleksi literatur dalam penelitian ini meliputi:

Identification – melakukan pencarian artikel melalui Scopus, Google Scholar, dan Garuda menggunakan kata kunci yang telah ditentukan.

Duplicate removal – mengidentifikasi dan menghapus artikel yang ditemukan lebih dari satu kali pada basis data yang berbeda.

Screening – menyeleksi artikel berdasarkan judul dan abstrak untuk mengeluarkan publikasi yang tidak relevan.

Eligibility – melakukan pemeriksaan teks lengkap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.

Inclusion – menetapkan artikel yang memenuhi seluruh kriteria sebagai literatur yang dianalisis.

Data extraction and synthesis – mengekstraksi informasi dari artikel terpilih, meliputi tahun publikasi, lokasi penelitian, metode M-E yang digunakan, jenis material, parameter mekanistik, indikator kerusakan, hasil penelitian, serta kelebihan dan keterbatasan metode.

Ekstraksi dan Analisis Data

Data dari 25 artikel terpilih diekstraksi menggunakan matriks analisis yang mencakup nama penulis, tahun publikasi, lokasi penelitian, tujuan penelitian, jenis perkerasan, metode atau model M-E yang digunakan, parameter mekanistik, indikator kinerja, hasil utama, serta keterbatasan penelitian. Data tersebut kemudian dianalisis secara deskriptif dan tematik untuk mengidentifikasi pola perkembangan penelitian, kecenderungan penggunaan parameter, efektivitas metode M-E dalam memprediksi fatigue cracking dan rutting, serta berbagai kendala penerapannya di Indonesia.

Hasil sintesis selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi research gap dan menentukan arah penelitian masa depan, khususnya terkait kebutuhan pengembangan basis data material dan lalu lintas, kalibrasi model berdasarkan kondisi lokal, validasi menggunakan data lapangan jangka panjang, serta integrasi faktor iklim dalam desain perkerasan mekanistik-empiris.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Literatur

Sebanyak 25 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis secara sistematis berdasarkan tahun publikasi, lokasi penelitian, pendekatan metodologis, parameter mekanistik, indikator kerusakan, perangkat lunak yang digunakan, serta temuan utama penelitian. Hasil sintesis menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan perhatian terhadap pendekatan mekanistik-empiris (Mechanistic-Empirical/M-E) dalam penelitian perkerasan lentur selama periode 2015–2025. Perkembangan tersebut mencerminkan adanya pergeseran dari pendekatan empiris yang bersifat konvensional menuju pendekatan berbasis respons mekanistik dan prediksi kinerja.

Secara umum, penelitian yang dikaji menggunakan parameter respons struktural untuk menghubungkan karakteristik material dan pembebanan dengan perkembangan kerusakan perkerasan. Dua indikator kerusakan yang paling banyak dibahas adalah fatigue cracking dan rutting. Selain itu, beberapa penelitian mulai mempertimbangkan pengaruh variasi material, kondisi lalu lintas, temperatur, serta karakteristik tanah dasar dalam proses prediksi kinerja. Meskipun demikian, terdapat variasi yang cukup besar dalam jenis data input, model prediksi, metode analisis, dan prosedur kalibrasi yang digunakan sehingga hasil penelitian belum sepenuhnya dapat dibandingkan secara langsung.

Perbandingan Pendekatan Empiris dan Mekanistik-Empiris

Hasil sintesis memperlihatkan perbedaan mendasar antara pendekatan empiris dan mekanistik-empiris dalam menganalisis kinerja perkerasan. Pendekatan empiris menggunakan hubungan yang diperoleh dari data historis antara parameter desain dan tingkat kerusakan. Keunggulan utamanya terletak pada prosedur yang relatif sederhana dan kebutuhan komputasi yang lebih rendah. Namun, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam menjelaskan respons mekanik lapisan perkerasan terhadap variasi beban dan kondisi lingkungan. Akibatnya, tingkat akurasi prediksi dapat menurun ketika model diterapkan pada kondisi yang berbeda dari kondisi yang digunakan dalam pengembangannya (Huang, 2004; AASHTO, 2008).

Sebaliknya, pendekatan M-E menggabungkan analisis mekanika struktur dengan model empiris kinerja. Respons perkerasan akibat beban lalu lintas dan lingkungan dihitung terlebih dahulu, kemudian dikonversi menjadi indikator kerusakan melalui model kinerja yang telah dikalibrasi. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih terperinci terhadap mekanisme kerusakan, termasuk hubungan antara regangan struktural dengan perkembangan fatigue cracking dan rutting. Oleh karena itu, metode M-E secara teoritis memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam mengevaluasi berbagai kombinasi material, struktur perkerasan, beban lalu lintas, dan kondisi lingkungan (NCHRP, 2004; AASHTO, 2020).

Dengan demikian, keunggulan M-E tidak semata-mata terletak pada kemampuan menghasilkan desain yang lebih ekonomis, tetapi terutama pada kemampuannya merepresentasikan hubungan antara beban–respons struktural–kerusakan–kinerja secara lebih eksplisit. Namun, peningkatan kompleksitas tersebut juga menyebabkan metode M-E membutuhkan data input yang lebih lengkap dan prosedur kalibrasi yang lebih ketat.

Parameter Dominan dalam Metode Mekanistik-Empiris

Berdasarkan sintesis terhadap 25 artikel, beberapa parameter mekanistik dan struktural secara konsisten digunakan dalam analisis M-E. Parameter tersebut meliputi regangan tarik horizontal, regangan tekan vertikal, modulus material, modulus resilien (resilient modulus/MR), ketebalan lapisan, beban lalu lintas, serta karakteristik lingkungan.

Regangan tarik horizontal pada bagian bawah lapisan beraspal umumnya digunakan sebagai indikator utama dalam prediksi fatigue cracking. Ketika regangan tarik akibat pembebanan berulang mencapai tingkat tertentu, kerusakan akibat kelelahan dapat berkembang secara kumulatif selama masa pelayanan. Sementara itu, regangan tekan vertikal pada lapisan tanah dasar banyak digunakan dalam evaluasi potensi rutting, karena deformasi permanen yang terjadi secara berulang dapat berkontribusi terhadap pembentukan alur pada permukaan perkerasan.

Selain respons regangan, modulus resilien (MR) menjadi parameter penting untuk merepresentasikan respons material tanah dasar terhadap pembebanan berulang. Nilai MR memengaruhi distribusi tegangan dan regangan dalam sistem perkerasan serta berkontribusi terhadap

respons struktural keseluruhan. Berdasarkan literatur yang dianalisis, variasi karakteristik tanah dasar dapat menghasilkan perbedaan respons struktural yang signifikan. Namun, temuan tersebut tidak serta-merta menunjukkan bahwa MR merupakan parameter paling sensitif pada seluruh kondisi perkerasan. Tingkat sensitivitas suatu parameter bergantung pada struktur perkerasan, karakteristik material, tingkat pembebanan, kondisi lingkungan, serta model kinerja yang digunakan.

Temuan ini menunjukkan bahwa pengembangan penerapan M-E di Indonesia perlu memperhatikan bukan hanya parameter struktural, tetapi juga kualitas dan representativitas data material yang digunakan sebagai input model.

Tren Penelitian

Analisis literatur menunjukkan beberapa kecenderungan utama dalam perkembangan penelitian M-E selama periode 2015–2025. Pertama, terdapat peningkatan penggunaan perangkat lunak dan pemodelan numerik untuk menghitung respons struktural perkerasan. Perangkat seperti KENPAVE dan CIRCLY digunakan dalam sejumlah penelitian untuk menganalisis distribusi tegangan, regangan, dan respons lapisan perkerasan akibat beban lalu lintas.

Kedua, perkembangan teknologi komputasi mendorong integrasi metode M-E dengan pendekatan berbasis Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning. Pendekatan tersebut berpotensi digunakan untuk meningkatkan kemampuan prediksi kinerja, terutama ketika tersedia dataset lapangan dalam jumlah besar. Meskipun demikian, integrasi AI dengan M-E masih memerlukan validasi yang kuat agar model yang dihasilkan tidak hanya memiliki akurasi prediktif tinggi, tetapi juga dapat dijelaskan secara teknis dan memiliki kemampuan generalisasi terhadap kondisi yang berbeda.

Ketiga, semakin banyak penelitian yang mempertimbangkan faktor lingkungan dan iklim dalam analisis kinerja perkerasan. Hal ini menjadi relevan bagi Indonesia yang memiliki karakteristik iklim tropis dengan temperatur dan curah hujan yang relatif tinggi serta variasi kondisi lingkungan antarwilayah. Integrasi faktor iklim dengan beban lalu lintas dan karakteristik material menjadi salah satu arah penting dalam pengembangan desain perkerasan berbasis kinerja.

Keterbatasan dan Tantangan Penerapan M-E di Indonesia

Sintesis terhadap literatur menunjukkan bahwa penerapan metode M-E di Indonesia masih menghadapi beberapa tantangan. Tantangan pertama berkaitan dengan ketersediaan dan konsistensi data material. Parameter seperti MR, modulus elastisitas, karakteristik campuran beraspal, dan sifat tanah dasar membutuhkan pengujian yang memadai dan representatif terhadap kondisi lapangan. Perbedaan karakteristik material antarwilayah dapat menyebabkan model yang dikembangkan pada suatu lokasi tidak secara langsung dapat diterapkan pada lokasi lainnya.

Tantangan kedua adalah kalibrasi dan validasi model. Model M-E pada umumnya dikembangkan berdasarkan hubungan antara respons mekanistik dan data kerusakan lapangan. Oleh karena itu, penggunaan model tanpa proses kalibrasi terhadap kondisi lokal berpotensi menghasilkan prediksi yang kurang representatif. Kebutuhan terhadap kalibrasi lokal menjadi semakin penting ketika terdapat perbedaan karakteristik lalu lintas, material, iklim, dan struktur perkerasan antara lokasi pengembangan model dan lokasi penerapannya.

Tantangan ketiga berkaitan dengan kompleksitas metodologi dan kebutuhan sumber daya. Implementasi M-E memerlukan kompetensi dalam mekanika perkerasan, karakterisasi material, analisis numerik, pengolahan data, serta interpretasi model kinerja. Selain itu, penggunaan perangkat lunak khusus dan kebutuhan data yang relatif besar dapat menjadi hambatan bagi penerapan secara luas.

Research Gap

Berdasarkan sintesis 25 artikel, terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang masih memerlukan perhatian. Pertama, penelitian mengenai M-E di Indonesia masih menunjukkan keterbatasan dalam pengembangan dan validasi model yang benar-benar merepresentasikan karakteristik lokal. Literatur yang tersedia menunjukkan adanya penggunaan model dan pendekatan yang beragam, tetapi konsistensi prosedur kalibrasi dan validasi belum sepenuhnya terbentuk.

Kedua, integrasi data lalu lintas aktual, termasuk karakteristik beban kendaraan berat dan fenomena overloading, masih perlu diperkuat. Kondisi pembebanan aktual memiliki pengaruh langsung terhadap respons struktural dan perkembangan kerusakan perkerasan. Oleh karena itu, penggunaan data lalu lintas yang lebih representatif diperlukan untuk meningkatkan reliabilitas prediksi kinerja.

Ketiga, masih terbatas penelitian yang menggunakan data monitoring lapangan jangka panjang untuk memvalidasi hubungan antara respons mekanistik dan perkembangan kerusakan aktual. Data semacam ini diperlukan untuk mengevaluasi apakah prediksi fatigue cracking dan rutting yang dihasilkan model benar-benar konsisten dengan kondisi perkerasan selama masa pelayanan.

Keempat, masih terdapat peluang penelitian untuk mengintegrasikan data material, lalu lintas, iklim, dan kinerja lapangan dalam satu kerangka pemodelan. Integrasi tersebut dapat menjadi dasar pengembangan sistem desain perkerasan yang lebih adaptif terhadap karakteristik wilayah Indonesia.

Framework Pengembangan M-E untuk Indonesia

Berdasarkan hasil sintesis dan research gap yang teridentifikasi, penelitian ini mengusulkan kerangka konseptual pengembangan penerapan metode M-E di Indonesia. Kerangka tersebut terdiri atas empat tahapan utama.

Tahap pertama adalah pembangunan database nasional, yang mencakup karakteristik material perkerasan, tanah dasar, volume dan distribusi lalu lintas, temperatur, curah hujan, serta data kerusakan perkerasan. Database tersebut diperlukan sebagai fondasi pengembangan model yang representatif terhadap kondisi Indonesia.

Tahap kedua adalah pengembangan dan kalibrasi model kinerja, khususnya model fatigue cracking dan rutting. Model yang digunakan perlu dikalibrasi menggunakan data lapangan Indonesia dan divalidasi terhadap segmen perkerasan dengan karakteristik yang berbeda untuk menguji kemampuan generalisasinya.

Tahap ketiga adalah integrasi dengan pedoman desain nasional, termasuk penguatan hubungan antara analisis mekanistik-empiris dan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ). Integrasi tersebut diharapkan dapat menghasilkan prosedur desain yang lebih konsisten, berbasis kinerja, dan responsif terhadap karakteristik lokal.

Tahap keempat adalah pemanfaatan teknologi AI dan Machine Learning sebagai teknologi pendukung untuk meningkatkan kemampuan prediksi kinerja. AI tidak diposisikan sebagai pengganti mekanisme M-E, tetapi sebagai pendekatan komplementer untuk mengolah dataset besar, mengidentifikasi pola nonlinier, dan meningkatkan kemampuan prediksi ketika tersedia data lapangan yang memadai.

Dengan demikian, framework yang diusulkan membentuk alur database nasional → analisis mekanistik → kalibrasi dan validasi lokal → integrasi MDPJ → pengembangan model prediktif berbasis AI. Kerangka ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem desain perkerasan lentur yang lebih akurat, adaptif, dan sesuai dengan karakteristik lalu lintas, material, dan lingkungan di Indonesia.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Systematic Literature Review terhadap 25 artikel yang diterbitkan selama periode 2015–2025, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan mekanistik-empiris (Mechanistic-Empirical/M-E) memiliki potensi yang lebih kuat dibandingkan pendekatan empiris konvensional dalam merepresentasikan kinerja perkerasan lentur. Keunggulan tersebut terutama berkaitan dengan kemampuan metode M-E dalam menghubungkan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan dengan respons mekanistik struktur perkerasan serta perkembangan kerusakan. Meskipun demikian, tingkat akurasi prediksi M-E sangat bergantung pada kualitas data input, pemilihan model kinerja, serta proses kalibrasi dan validasi terhadap kondisi lokal.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa regangan tarik, regangan tekan, dan modulus resilien (MR) merupakan beberapa parameter penting yang secara konsisten digunakan dalam analisis M-E. Regangan tarik pada lapisan beraspal berkaitan dengan prediksi fatigue cracking, sedangkan regangan tekan pada tanah dasar berperan dalam evaluasi potensi rutting. Sementara itu, MR digunakan untuk merepresentasikan respons tanah dasar terhadap pembebanan berulang dan memengaruhi respons struktural keseluruhan sistem perkerasan.

Dalam konteks Indonesia, penerapan M-E masih menghadapi tantangan, terutama terkait ketersediaan dan representativitas data material, data lalu lintas aktual, data kinerja jangka panjang, serta kebutuhan kalibrasi dan validasi lokal. Variasi karakteristik material, iklim, kondisi tanah dasar, dan beban lalu lintas antarwilayah menunjukkan bahwa penggunaan model yang dikembangkan dari kondisi eksternal tanpa penyesuaian lokal perlu dilakukan secara hati-hati.

Secara keseluruhan, temuan penelitian mengindikasikan perlunya suatu framework nasional penerapan M-E yang mengintegrasikan database material dan lalu lintas, model kinerja yang terkalibrasi secara lokal, data monitoring lapangan, serta pedoman desain perkerasan nasional. Pengembangan framework tersebut berpotensi memperkuat penerapan desain perkerasan berbasis kinerja dan meningkatkan kemampuan prediksi umur layanan perkerasan lentur di Indonesia.

Implikasi Penelitian

Secara akademik, penelitian ini memberikan kontribusi melalui pemetaan sistematis terhadap perkembangan penerapan metode M-E pada perkerasan lentur di Indonesia selama satu dekade terakhir. Sintesis yang dilakukan menunjukkan bahwa penelitian M-E telah berkembang dari analisis respons struktural menuju pendekatan yang lebih terintegrasi dengan pemodelan kinerja, teknologi komputasi, data lingkungan, dan kecerdasan buatan.

Secara praktis, hasil penelitian memberikan implikasi bagi peneliti, perencana jalan, dan pemangku kebijakan bahwa penerapan M-E perlu didukung oleh data lokal yang berkualitas dan prosedur kalibrasi yang konsisten. Dengan demikian, pengembangan metode M-E tidak cukup hanya melalui adopsi perangkat lunak atau model yang telah tersedia, tetapi harus disertai pengembangan sistem data dan validasi lapangan yang mampu merepresentasikan kondisi perkerasan di Indonesia.

SARAN

Pengembangan dan kalibrasi model M-E lokal. Penelitian selanjutnya perlu mengembangkan model fatigue cracking dan rutting yang dikalibrasi menggunakan data kinerja perkerasan Indonesia serta divalidasi pada berbagai kondisi wilayah.

Pengembangan database material nasional. Diperlukan basis data yang terintegrasi mengenai karakteristik material perkerasan, termasuk modulus resilien, modulus material beraspal, sifat tanah dasar, dan parameter mekanistik lainnya.

Integrasi data lalu lintas aktual. Penelitian selanjutnya perlu memasukkan karakteristik lalu lintas aktual, khususnya distribusi beban sumbu, volume kendaraan berat, pertumbuhan lalu lintas, dan fenomena overloading, karena faktor tersebut berpengaruh terhadap respons dan kerusakan perkerasan.

Penguatan monitoring kinerja jangka panjang. Data lapangan yang diperoleh melalui pemantauan berkala diperlukan untuk memvalidasi hubungan antara respons mekanistik yang diprediksi model dan kerusakan aktual selama masa pelayanan.

Integrasi faktor iklim. Pengembangan M-E di Indonesia perlu mempertimbangkan variasi temperatur, curah hujan, kelembapan, dan perubahan kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi karakteristik material serta kinerja perkerasan.

Integrasi M-E dengan teknologi digital dan AI. Artificial Intelligence dan Machine Learning dapat dikembangkan sebagai pendekatan komplementer untuk meningkatkan kemampuan prediksi, terutama ketika tersedia database perkerasan yang besar dan berkualitas.

Integrasi dengan praktik desain nasional. Hasil pengembangan dan kalibrasi model M-E perlu diintegrasikan secara bertahap ke dalam praktik perencanaan jalan dan penyempurnaan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) agar penerapan desain berbasis kinerja dapat dilakukan secara lebih konsisten di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2020). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice (3rd ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.

- ARA, Inc. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report, NCHRP Project 1-37A. Transportation Research Board, National Research Council.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Nomor 02/M/BM/2017. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Transportation Research Board, National Research Council.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>