

Analisis Perbandingan Tebal Struktur Perkerasan Jalan Kaku Menggunakan Metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024

I Putu Chandra Wibawa^{a,*}, I Made Agus Ariawan^b, Putu Kwintaryana Winaya^c

^aUniversitas Warmadewa, Denpasar

^{b,c} Universitas Udayana, Denpasar

*Corresponding author, email address: chandrawibawa@warmadewa.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 3 Juli 2025

Revised: 20 Agustus 2025

Accepted: 30 September 2025

Available Online: 25 November 2025

Kata Kunci:

Perkerasan kaku, AASHTO 1993, Pd T-14-2003, MDP 2024

Keywords:

Rigid pavement, AASHTO 1993, Pd T-14-2003, MDP 2024

ABSTRAK

Perencanaan perkerasan jalan yang andal penting untuk menjamin umur rencana dan kinerja struktural, terutama pada ruas jalan dengan volume lalu lintas tinggi seperti pada rencana Jalan Tol Gilimanuk–Mengwi. Penelitian ini memiliki urgensi untuk membandingkan metode desain tebal perkerasan kaku berbasis pendekatan empiris dan mekanistik empiris terhadap kondisi lapangan di Indonesia, yang memiliki karakteristik iklim tropis dengan curah hujan tinggi serta tanah dasar bervariasi. Penelitian ini bertujuan membandingkan hasil tebal perkerasan kaku dengan metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan Manual Desain Perkerasan 2024 (MDP 2024). Metode penelitian dilakukan menggunakan pedoman desain perencanaan pada tebal pelat beton, yaitu AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024. Hasil analisis menunjukkan metode AASHTO 1993 menghasilkan tebal pelat 30,00 cm dengan nilai W_{18} sebesar 31.363.966 ESA, menunjukkan efisiensi struktural tinggi. Metode Pd T-14-2003 memperlihatkan hasil analisis fatigue dan erosi dengan nilai persentase kerusakan di bawah 100%, menandakan desain yang aman secara struktural. Sementara metode MDP 2024 menghasilkan nilai fatigue 0% dan erosi 92,77%, mengindikasikan ketahanan tinggi terhadap beban berulang dan potensi erosi tanah dasar. Kesimpulannya, metode MDP 2024 paling representatif dan adaptif terhadap kondisi lalu lintas serta lingkungan di Indonesia. Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan dasar ilmiah untuk pemilihan metode desain perkerasan kaku dalam konsep empiris maupun mekanistik empiris.

ABSTRACT

Reliable pavement design is essential to ensure service life and structural performance, particularly on roads with high traffic volumes such as the Gilimanuk–Mengwi Toll Road. This study compares rigid pavement design methods applying empirical and mechanistic–empirical principles under Indonesian field conditions characterized by a tropical climate, high rainfall, and variable subgrade properties. The objective of this research is to compare rigid pavement thickness results using the AASHTO 1993, Pd T-14-2003, and Pavement Design Manual 2024 (MDP 2024) methods. The study was conducted based on the design guidelines for determining concrete slab thickness according to each method: AASHTO 1993, Pd T-14-2003, and MDP 2024 methods. The analysis shows that AASHTO 1993 produced a 30.00 cm slab with a W_{18} value of 31,363,966 ESA, indicating high structural efficiency. The Pd T-14-2003 method showed fatigue and erosion damage below 100%, indicating a structurally safe design. Meanwhile, the MDP 2024 method produced a fatigue value of 0% and erosion of 92.77%, showing indicating high resistance to repeated loads and potential subgrade erosion. In conclusion, the MDP 2024 method is the most representative and adaptive to Indonesian traffic and environmental conditions. This research contributes by providing a scientific foundation for selecting rigid pavement design methods under both empirical and mechanistic–empirical approaches.



1. PENDAHULUAN

Peningkatan infrastruktur jalan tol di Indonesia, termasuk rencana pembangunan Jalan Tol Gilimanuk - Mengwi, menuntut perencanaan perkerasan yang tahan lama, ekonomis, dan efisien terhadap beban lalu lintas tinggi dan kondisi lingkungan beriklim tropis. Perkerasan jalan merupakan struktur berlapis di atas tanah dasar yang ditujukan untuk menahan beban lalu lintas kendaraan tanpa mengalami deformasi atau retak [1], [2]. Salah satu komponen kritis dari perencanaan perkerasan jalan pada struktur perkerasan kaku yaitu: mampu menahan beban lalu lintas tinggi, memiliki umur layanan yang relatif lama, memiliki durabilitas yang tinggi dan membutuhkan tingkat pemeliharaan yang rendah. Pertimbangan perencanaan perkerasan jalan kaku yang umum digunakan pada konstruksi jalan meliputi beberapa aspek, diantaranya: beban lalu lintas, *material properties*, kondisi tanah dasar, pengaruh iklim agar umur layanan lama serta mempertimbangkan biaya siklus hidup (*life cycle cost*) [3], [4], [5], [6]. Dalam konteks global, metode desain perkerasan kaku sangat menentukan kinerja jangka panjang dan biaya siklus hidup [7]. Kelemahan tanah dasar dapat meningkatkan risiko retak *faulting* pada pelat beton perkerasan kaku [8], [9], sehingga aspek tanah dasar merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi desain ketebalan perkerasan jalan dan biaya konstruksi jalan [10], [11]. Aspek material akan mempengaruhi desain struktur perkerasan jalan, terutama pada sifat modulus material yang digunakan [12], [13], [14].

Metode desain perkerasan kaku yang umum digunakan di Indonesia antara lain: Metode Guide for Design of Pavement Structures 1993 (AASHTO1993), Metode Depkimpraswil Pd T-14-2003, dan metode terbaru dari Kementerian PUPR yaitu Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 (MDP 2024). Penerapan perencanaan perkerasan jalan kaku menggunakan metode AASHTO 1993 dan Pd T-14-2003 [15] menggunakan konsep empiris. Ketika pedoman desain perkerasan jalan di Indonesia diperbarui menggunakan MDP 2024 [16], konsep desain sudah menggunakan *mechanistic empirical*/mekanistik empiris (ME). Perpindahan pendekatan desain dari metode empiris menuju pendekatan mekanistik empiris menuntut evaluasi komparatif pada proyek nyata agar hasil teori dapat dipastikan relevan dan dapat diaplikasikan menyesuaikan keadaan lingkungan [17], [18], [19]. Kajian perencanaan perkerasan kaku menggunakan MDP 2024 masih terbatas di Indonesia mengenai penelitian yang membandingkan implementasi pedoman nasional menggunakan metode terbaru MDP 2024 pada jalan di Indonesia. Oleh karena itu, adanya perbedaan konsep perencanaan empiris dengan mekanistik empiris akan menghasilkan desain yang berbeda sehingga penelitian ini perlu dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil desain ketebalan struktur perkerasan kaku dengan metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024 dengan studi kasus pada rencana Jalan Tol Gilimanuk–Mengwi.

Penelitian antara metode empiris dengan mekanistik empiris di berbagai negara menunjukkan bahwa faktor iklim (siklus suhu dan kelembaban) serta kondisi *subgrade* dapat mengubah estimasi kerusakan *fatigue* dan *faulting* secara signifikan, sehingga pendekatan mekanistik empiris yang menggabungkan analisis tegangan regangan menghasilkan prediksi performa yang lebih realistis [17], [20], [21], [22]. Faktor lingkungan seperti iklim dan pengaruh paparan sinar matahari akan mempengaruhi kinerja perkerasan jalan [23], oleh karena itu faktor lingkungan diperhitungkan karena akan mempengaruhi durabilitas *material properties*. Penelitian dilakukan oleh [21] mengenai analisis sensitivitas terhadap perkerasan kaku dengan mekanistik empiris bahwa kondisi iklim, lalu lintas, material, lapisan perkerasan, serta kondisi perkerasan akan mempengaruhi desain perkerasan jalan dan kerusakan terhadap perkerasan jalan. *Material properties* perkerasan jalan yang baik akan berpengaruh terhadap kualitas material sesuai dengan spesifikasi [24]. Konsep perencanaan perkerasan dengan mekanistik empiris mendukung kebutuhan penyesuaian lingkungan lokal pada konsep perencanaan perkerasan jalan di Indonesia. Peraturan terkini seperti MDP 2024 diharapkan lebih mencerminkan kondisi lokal di Indonesia seperti iklim, jenis tanah, karakteristik lalu lintas, sehingga penting untuk mengetahui bagaimana hasil desain berbeda dibandingkan dengan metode terdahulu.

Beberapa studi di Indonesia mengenai perencanaan perkerasan jalan kaku menggunakan metode AASHTO 1003, metode Pd T-14-2003, metode MDP 2017. Penelitian dilakukan oleh [25], [26], [27] mendesain perkerasan kaku menggunakan metode AASHTO menghasilkan pelat beton pada tebal lapisan perkerasan kaku yang berbeda karena dipengaruhi oleh parameter: lalu lintas, umur rencana, faktor *reliability* (R) dan *standard normal deviate* (Z_R), *terminal serviceability index* (P_t), koefisien transfer beban, koefisien drainase, modulus reaksi tanah dasar, modulus elastisitas beton, serta *flexural strength*. Penelitian dilakukan oleh [28], [29], [30] mendesain perkerasan kaku menggunakan metode Pd T-14-2003 menghasilkan pelat beton pada tebal lapisan perkerasan kaku yang berbeda yang dipengaruhi oleh parameter: CBR efektif dan jenis pondasi bawah, kuat tarik lentur beton, Jumlah Sumbu Kendaraan Niaga (JSKN), faktor keamanan beban, serta analisis *fatigue* dan erosi. Penelitian dilakukan oleh [31] perkerasan kaku menggunakan metode MDP 2017 menghasilkan pelat beton pada tebal lapisan perkerasan kaku yang berbeda yang dipengaruhi oleh parameter: lalu lintas, jumlah kelompok sumbu kendaraan, kumulatif beban kendaraan, serta perencanaan fondasi dan jenis fondasi. Penelitian dilakukan oleh [32] membandingkan perencanaan perkerasan kaku menggunakan metode MDP 2017 dengan AASHTO 1993 menghasilkan tebal pelat beton 305 mm dengan metode MDP 2017 dan 320 mm dengan metode AASHTO 1993.

Adanya pembaruan dalam regulasi/standar desain terbaru menggunakan MDP 2024, masih terbatas penelitian yang secara sistematis membandingkan tiga metode: AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024 dengan studi kasus rencana Jalan Tol Gilimanuk-Mengwi. Kebaharuan penelitian ini terletak pada penerapan ketiga metode desain perkerasan jalan kaku menggunakan metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024 pada studi kasus rencana Jalan Tol Gilimanuk-Mengwi sehingga perbandingan bersifat langsung dan komparatif. Selain itu, pedoman MDP 2024 merupakan aturan terbaru yang mengusung konsep mekanistik empiris pada jalan tol sehingga masih terbatas penerapannya di Indonesia. Hasil penelitian diharapkan berkontribusi untuk menambah literatur komparatif yang melibatkan pedoman nasional terbaru, aspek teknis-praktis yang memberikan rekomendasi desain dari perbandingan metode empiris dan mekanistik empiris, serta sebagai rekomendasi berbasis bukti untuk penerapan lebih luas MDP 2024 dibandingkan metode Pd T-14-2003 yang masih menggunakan metode empiris.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Perencanaan Perkerasan Jalan Konsep Empiris

Perencanaan perkerasan jalan konvensional banyak didasarkan pada metode empiris, yaitu prosedur yang dikembangkan dari hasil uji lapangan besar dan observasi historis mengenai hubungan antara kondisi tanah, beban lalu lintas, ketebalan lapisan, dan umur layanan. Metode empiris bersifat praktis dan relatif sederhana karena hanya memerlukan sejumlah parameter ringkas misalnya CBR, ESAL atau jumlah kendaraan ekuivalen, dan beberapa faktor iklim serta korelasi statistik yang telah terbukti [33]. Pedoman-pedoman lama seperti AASHTO 1993 dan berbasis hasil uji lapangan klasik merupakan contoh penerapan prinsip empiris yang luas dipakai di banyak negara karena kemudahan dan kecepatan aplikasinya [34], [35]. Perspektif sensitivitas terhadap CBR serta *Equivalent Single Axle Loads* (ESAL) menjadi sangat penting pada metode empiris yang berbasis kondisi lingkungan yang dapat mengubah respons struktur [36], [37], [38]. Metode empiris merupakan metode perancangan sederhana, cepat, dan hemat data sehingga praktis untuk desain awal atau lokasi dengan keterbatasan data, namun terbatas dalam memodelkan keadaan lingkungan setempat dan variasi kedalaman *subgrade* [39].

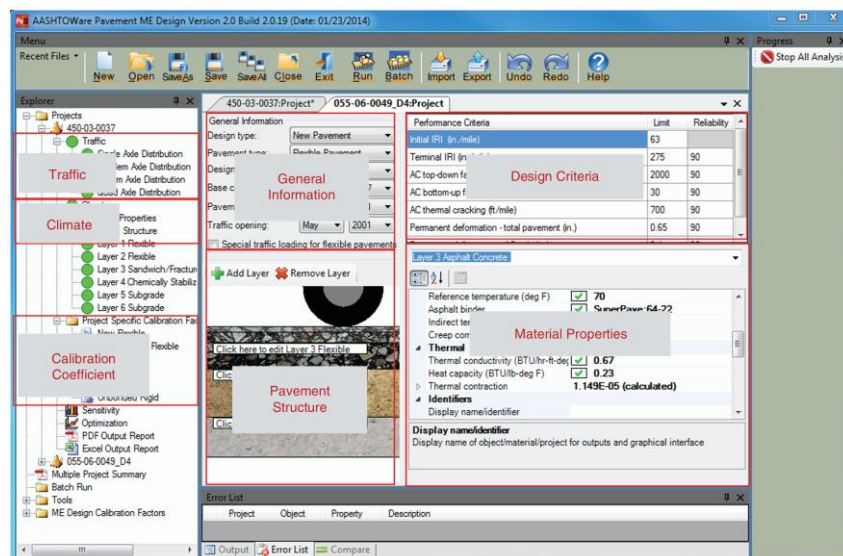
Meskipun metode empiris seperti AASHTO 1993 dan Pd T-14-2003 di Indonesia masih digunakan dalam perencanaan perkerasan kaku, namun adanya variasi kondisi tanah dasar di lapangan menimbulkan ketidakpastian terhadap ketebalan pelat beton beserta struktur perkerasan di bawahnya. Modulus reaksi tanah dasar dan CBR sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi desain ketebalan perkerasan jalan [11], [40]. Metode empiris cenderung lebih sensitif terhadap perubahan modulus reaksi tanah dasar, kondisi iklim, serta karakteristik lalu lintas sehingga hasilnya seringkali menghasilkan ketebalan lapisan yang berbeda [41]. Menurut [42] dalam *Pavement Analysis and Design*, pendekatan empiris mengandalkan hasil uji jalan yang dilakukan dalam kondisi tertentu, kemudian hasilnya diadaptasi untuk digunakan pada

wilayah lain dengan faktor koreksi tertentu. Metode ini sederhana dan mudah diterapkan karena hanya memerlukan beberapa parameter dasar seperti beban lalu lintas kumulatif, daya dukung tanah (CBR atau *k-value*), dan reliabilitas desain. Namun, pendekatan empiris memiliki keterbatasan karena kurang mampu memperhitungkan kondisi yang berbeda dari lokasi pengujian aslinya, seperti iklim tropis, variasi material lokal, dan interaksi beban dinamis modern [42].

2.2 Perencanaan Perkerasan Jalan Konsep Mekanistik Empiris

Perencanaan perkerasan secara mekanistik empiris merupakan pendekatan perencanaan struktur perkerasan yang menggabungkan konsep mekanika rekayasa (*mechanistic*) dan data empiris lapangan (*empirical*) untuk memprediksi kinerja perkerasan terhadap beban lalu lintas, kondisi lingkungan, serta karakteristik material [43], [44], [45]. Pendekatan mekanistik empiris dikembangkan sebagai penyempurnaan dari metode empiris yang memiliki keterbatasan dalam memperhitungkan faktor iklim, variasi material, dan perilaku tegangan regangan. Metode mekanistik empiris didasarkan pada analisis respon struktural tegangan dan regangan akibat beban roda, yang kemudian dikalibrasi dengan data empiris untuk memprediksi kerusakan seperti retak dan deformasi selama umur rencana perkerasan [46], [47]. Keunggulan metode mekanistik empiris adalah kemampuannya dalam mensimulasikan kondisi lapangan yang kompleks dengan memanfaatkan data iklim jangka panjang, variasi material, dan konfigurasi struktur perkerasan yang berlapis-lapis [48]. Metode mekanistik empiris menggunakan konsep yang mampu mengintegrasikan beban lalu lintas dan pengaruh iklim, sehingga ketebalan lapisan perkerasan tidak lagi ditentukan secara empiris, tetapi dihitung berdasarkan respon mekanistik terhadap beban lalu lintas [46].

Konsep mekanistik empiris adalah pendekatan yang mampu mengintegrasikan beban lalu lintas dan pengaruh iklim regional dalam satu sistem analisis [49]. Model mekanistik empiris mampu memprediksi perilaku perkerasan jangka panjang dengan akurasi tinggi jika parameter lingkungan, material, dan lalu lintas diperoleh melalui survei lapangan dan pemodelan iklim [49]. Seiring dengan berkembangnya teknologi, penerapan konsep mekanistik empiris dapat dilakukan pada AASHTOWare Pavement ME Design program seperti yang ditampilkan pada Gambar 1. Penerapan pendekatan metode mekanistik empiris pada kondisi iklim tropis seperti di Indonesia, sudah diaplikasikan dalam MDP 2024 serta diharapkan mampu menghasilkan desain perkerasan yang lebih efisien, adaptif terhadap lingkungan, dan berkelanjutan dibandingkan metode empiris seperti AASHTO 1993 dan Pd T-14-2003.



Gambar 1. Pengerapan konsep mekanistik empiris dengan AASHTOWare Pavement ME Design
Sumber: [49]

3. METODE PENELITIAN

3.1 Data Perencanaan

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari laporan kerja praktik pada rencana Jalan Tol Gilimanuk – Mengwi. Data tersebut diperlukan untuk mendukung proses analisis tebal perkerasan kaku berdasarkan ketiga metode AASHTO 1993, Pd T-14-2003, dan MDP 2024. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pendekatan studi dokumen teknis proyek. Data yang digunakan untuk perencanaan, diantaranya meliputi: LHRT dan faktor distribusi arah, umur rencana, CBR, modulus reaksi tanah dasar, mutu beton, nilai reliabilitas, nilai *standard normal deviation*, nilai standar deviasi, *initial serviceability* dan *terminal serviceability index*, koefisien koefisien transfer beban, koefisien drainasi, modulus elastisitas beton, kekuatan lentur beton, dan sebagainya. Data LHRT dapat dilihat pada rangkuman Tabel 1.

Tabel 1. Data LHRT kendaraan

Golongan	Jenis Kendaraan	LHRT
1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3	23.483
2,3,4	Kendaraan ringan - sedan, jeep, station wagon, pick up, micro truck	6.092
5A	Bus kecil	704
5B	Bus besar	128
6A	Truck 2 sumbu – truk ringan	2.235
6B	Truck 2 sumbu – truk berat	0
7A1	Truck 3 sumbu – truk ringan	1.598
7A2	Truck 3 sumbu – truk berat	0
7B1	Truck 2 sumbu dan trailer penarik 2 sumbu (Truk 4 sumbu-berat)	0
7B2	Truck 2 sumbu dan trailer penarik 3 sumbu (Truk 5 sumbu-berat)	0
7C1	Truck 4 sumbu trailer (Truk 4 sumbu-berat)	0
7C2.A	Truck 5 sumbu trailer (Truk 5 sumbu-berat)	0
7C2.B	Truck 5 sumbu trailer (Truk 5 sumbu-berat)	0
7C3	Truck 6 sumbu trailer (Truk 6 sumbu-berat)	0

3.2 Metode Perencanaan AASHTO 1993

Metode AASHTO 1993 merupakan pendekatan empiris yang dikembangkan berdasarkan hasil uji jalan AASHO *Road Test* dan digunakan secara luas untuk merencanakan perkerasan jalan. Pada perencanaan jalan kaku, prosedur ini bertujuan untuk menentukan tebal pelat beton yang mampu menahan beban lalu lintas selama umur rencana dengan mempertimbangkan faktor-faktor keandalan, kinerja, dan kondisi tanah dasar. Berikut tahapan perencanaan metode AASHTO 1993 secara sistematis:

1. Tahap analisis lalu lintas dengan menentukan beban lalu lintas ekuivalen (W_{18}) selama umur rencana dalam satuan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL). Nilai W_{18} dihitung dari Lalu Lintas Harian Rata-Rata (LHR) kendaraan berat yang dikonversi menjadi beban sumbu standar.
2. Tahap menentukan parameter reliabilitas (R) yang menunjukkan tingkat keyakinan bahwa perkerasan akan berfungsi sesuai umur rencana tanpa mengalami kegagalan yang signifikan. Nilai R dipilih berdasarkan fungsi dan klasifikasi jalan, dengan kisaran antara 50% hingga 99,9%.
3. Tahap menentukan parameter kinerja fungsional yang dievaluasi berdasarkan perubahan tingkat pelayanan (*serviceability*) yang diukur dengan *Present Serviceability Index* (PSI). Dalam perencanaan, digunakan dua nilai yaitu: *initial serviceability index* (p_o) dan *terminal serviceability index* (p_t).
4. Tahap menentukan koefisien transfer beban yang merepresentasikan kemampuan sambungan pelat beton dalam menyalurkan beban antar pelat. Nilainya tergantung jenis sambungan, efisiensi *dowel bar*, dan kualitas konstruksi.
5. Tahap menentukan koefisien drainase yang berpengaruh besar terhadap daya tahan perkerasan. Pada perencanaan tebal perkerasan jalan, kualitas drainase ditentukan berdasarkan kemampuan mengalirkan air dari struktur perkerasan.
6. Tahap menentukan modulus reaksi tanah dasar (k) yang menunjukkan kekakuan dukungan tanah terhadap beban dari pelat beton. Modulus reaksi tanah dasar menggunakan gabungan formula dan grafik penentuan modulus reaksi tanah dasar berdasarkan ketentuan CBR tanah dasar.

7. Tahap menentukan modulus elastisitas beton yang menggambarkan kemampuan beton menahan deformasi elastis di bawah beban.
8. Tahap menentukan kuat lentur beton atau *modulus of rupture* yang digunakan untuk menentukan kemampuan pelat menahan momen akibat beban lalu lintas. Parameter ini sangat penting karena menjadi dasar perhitungan regangan lentur maksimum yang diperbolehkan.
9. Tahap menghitung tebal perkerasan kaku menggunakan persamaan desain empiris AASHTO 1993, yang menghubungkan variabel-variabel seperti reliabilitas, variasi kinerja, lalu lintas ekuivalen, modulus reaksi tanah, kuat lentur, dan faktor drainase.

$$\log_{10} W_{18} = Z_R S_o + 7,35 \log_{10}(D + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 p_t) \times \log_{10} \frac{S'_c C_d \times [D^{0,75} - 1,132]}{215 \times J \times \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c : k)^{0,25}} \right]} \quad (1)$$

Keterangan:

- W_{18} : Jumlah total repetisi beban lalu lintas ekuivalen
 Z_R : Standar deviasi normal
 S_o : Standar deviasi
 D : Tebal perkerasan
 ΔPSI : *Serviceability loss*
 p_t : Indeks permukaan akhir
 S'_c : Kuat lentur beton/ *modulus of rupture*
 C_d : Koefisien drainase
 J : Koefisien transfer beban
 E_c : Modulus elastisitas beton
 k : Modulus reaksi tanah dasar

3.3 Metode Perencanaan Pd T-14-2003

Metode Pd T-14-2003 merupakan pedoman nasional yang digunakan di Indonesia untuk merencanakan struktur perkerasan kaku dengan pendekatan empiris. Tujuannya adalah memperoleh tebal pelat beton yang optimal, tahan terhadap beban lalu lintas dengan analisis kelelahan (*fatigue*) dan analisis erosi. Metode Pd T-14-2003 menawarkan pendekatan yang lebih kontekstual terhadap kondisi iklim dan jenis tanah di Indonesia dibandingkan metode AASHTO 1993. Berikut tahapan perencanaan metode Pd T-14-2003 secara sistematis:

1. Tahap pemilihan jenis perkerasan beton semen dimulai dengan memilih tipe perkerasan, meliputi: perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan, perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan, perkerasan beton semen menerus dengan tulangan.
2. Tahap pemilihan jenis dan ketebalan pondasi bawah yang dilakukan berdasarkan nilai CBR tanah dasar. Lapisan ini berfungsi menyebarkan beban, meningkatkan daya dukung, serta mengurangi efek erosi di bawah pelat.
3. Tahap menentukan kekuatan dan mutu beton yang memiliki mutu yang menjamin kekuatan lentur (*flexural strength*) dan ketahanan terhadap kelelahan. Nilai kuat lentur beton pada umur 28 hari ditentukan melalui pengujian laboratorium secara tipikal sekitar 3–5 MPa (30-50 kg/cm²).
4. Tahap analisis lalu lintas berdasarkan konfigurasi sumbu kendaraan, beban lalu lintas dibedakan menjadi: Sumbu tunggal roda tunggal (STRT), Sumbu tunggal roda ganda (STRG), Sumbu tandem roda ganda (STdRG), dan Sumbu tridem roda ganda (STrRG). Setelah menentukan konfigurasi kendaraan maka tahapan selanjutnya dapat menghitung Jumlah Kumulatif Sumbu Kendaraan Niaga (JSKN) selama umur rencana.
5. Tahap penetapan faktor keamanan beban (FKB) sebagai koreksi untuk mengantisipasi variasi beban kendaraan dan ketidakpastian kondisi lapangan. Nilai FKB umumnya berkisar antara 1,0 hingga 1,2.

6. Tahap penentuan tegangan ekuivalen (TE) dan faktor erosi (FE) yang ditentukan pada Tegangan Ekuivalen (TE) dan Faktor Erosi (FE). Nilai TE diperoleh berdasarkan jenis sumbu kendaraan, sedangkan FE diperoleh berdasarkan ada atau tidak adanya ruji/beton bertulang.
7. Tahap perhitungan faktor rasio tegangan (FRT) yang dihitung dari perbandingan antara tegangan ekuivalen dengan kuat Tarik lentur beton. Nilai FRT menunjukkan seberapa besar tegangan aktual mendekati kapasitas lentur maksimum beton.
8. Tahap analisis *fatigue* dan analisis erosi yang dihitung jumlah repetisi beban izin terhadap kelelahan beton dan erosi pondasi berdasarkan grafik hubungan antara tegangan, beban, dan umur kelelahan (*fatigue life*). Selanjutnya, dibandingkan dengan jumlah repetisi beban rencana untuk menentukan persentase kerusakan akibat kedua mekanisme tersebut.
9. Tahap iterasi penentuan ketebalan pelat beton dengan melakukan proses iterasi desain dengan menyesuaikan tebal pelat beton hingga total kerusakan akibat *fatigue* dan erosi $\leq 100\%$. Tebal yang memenuhi kondisi tersebut dianggap sebagai desain optimal, menjamin keseimbangan antara kekuatan struktural dan efisiensi biaya.

3.4 Metode Perencanaan MDP 2024

Proses perencanaan perkerasan jalan kaku dengan metode MDP 2024 dilakukan secara bertahap untuk memastikan ketahanan struktural, efisiensi biaya, serta umur layan yang optimal. Setiap tahap saling berkaitan mulai dari pemilihan tipe perkerasan hingga evaluasi akhir terhadap kerusakan kumulatif akibat beban lalu lintas. Berikut tahapan perencanaan Metode MDP 2024 secara sistematis:

1. Tahap pemilihan jenis perkerasan beton semen dimulai dengan memilih tipe perkerasan beton yang sesuai dengan fungsi jalan, volume lalu lintas, dan kondisi iklim setempat. Jenis perkerasan yang umum digunakan meliputi: JPCP (*Jointed Plain Concrete Pavement*), JRCP (*Jointed Reinforced Concrete Pavement*), atau CRCP (*Continuously Reinforced Concrete Pavement*).
2. Tahap penentuan jenis dan tebal fondasi bawah yang ditentukan berdasarkan nilai CBR tanah dasar dan jumlah sumbu kendaraan niaga (JSKN) yang diperkirakan selama umur rencana jalan.
3. Tahap penentuan nilai CBR efektif yang menjadi dasar bagi penentuan tebal pelat beton yang mampu mendukung beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi berlebihan.
4. Tahap penentuan mutu beton yang dinyatakan dalam kuat tarik lentur pada umur 28 hari. Nilai kuat tarik lentur yang lebih tinggi menunjukkan ketahanan terhadap beban lentur akibat roda kendaraan.
5. Tahap penetapan faktor keamanan beban lalu lintas yang digunakan untuk mengantisipasi variasi beban aktual di lapangan serta ketidakpastian asumsi lalu lintas. Nilai ini menambah margin keamanan struktural, memastikan pelat beton tidak gagal akibat kelebihan beban yang mungkin terjadi selama umur rencana.
6. Tahap penetapan tebal minimum pelat beton yang ditetapkan berdasarkan MDP 2024, yang memberikan batas bawah ketebalan agar struktur tetap aman terhadap retak dan deformasi. Nilai ini menjadi acuan dasar sebelum dilakukan optimasi desain.
7. Tahap estimasi awal tebal pelat desain yang dilakukan dengan menambah tebal pelat sedikit di atas nilai minimum. Penentuan ini bersifat iteratif dan berbasis pengalaman atau desain pembandingan dari proyek serupa. Estimasi ini akan diuji kembali dalam tahap analisis *fatigue* dan analisis erosi.
8. Tahap penentuan tegangan ekuivalen dan faktor erosi yang dihitung berdasarkan beban pada sumbu roda tunggal (STRT). Parameter ini digunakan untuk menganalisis respon lentur dan potensi degradasi di bawah pelat akibat gaya berulang dari kendaraan berat.
9. Tahap penentuan beban rencana per roda dengan cara beban aktual per roda dihitung dan dikalikan dengan faktor keamanan beban untuk memperoleh beban rencana per roda. Nilai ini menjadi dasar untuk menganalisis daya tahan beton terhadap kelelahan serta stabilitas fondasi.

10. Tahap perhitungan total *fatigue* dan erosi setiap kelompok sumbu untuk setiap beban roda dijumlahkan dalam satu kelompok sumbu kendaraan. Perhitungan analisis *fatigue* dihitung sesuai Persamaan 2 sampai dengan Persamaan 4 sedangkan analisis erosi dihitung sesuai Persamaan 5.
11. Tahap penentuan total kerusakan kumulatif dari seluruh nilai *fatigue* dan erosi dari berbagai kelompok sumbu dijumlahkan untuk memperoleh total kerusakan kumulatif perkerasan selama umur rencana. Nilai total ini menunjukkan sejauh mana desain mampu menahan beban lalu lintas secara keseluruhan tanpa mengalami kegagalan struktural.
12. Tahap iterasi penentuan ketebalan optimal pada desain bersifat iteratif, dengan menyesuaikan sampai total kerusakan akibat *fatigue* dan erosi $\leq 100\%$. Ketebalan yang memenuhi kriteria ini dianggap sebagai tebal desain akhir, yaitu kondisi paling efisien antara keamanan struktural dan biaya.

$$\log_{10} N_f = \frac{0,9719 - S_r}{0,0828} \text{ jika } S_r > 0,55 \quad (2)$$

$$N_f = \left(\frac{4,258}{S_r - 0,4325} \right)^{3,268} \text{ jika } 0,45 \leq S_r \leq 0,55 \quad (3)$$

$$S_r = \frac{S_e}{0,944 f_{cf}} \left(\frac{P L_{SF}}{4,45 F_1} \right)^{0,94} \quad (4)$$

Keterangan:

- N_f : Jumlah repetisi beban yang diizinkan
- S_r : besar tegangan aktual (S_e) terhadap kapasitas lentur beton (f_{cf}) akibat pengaruh beban kelompok sumbu dan faktor *load safety*
- S_e : Tegangan ekuivalen beton (MPa)
- f_{cf} : Kuat lentur karakteristik desain pada umur beton 28 hari (MPa)
- P : Beban kelompok sumbu (kN)
- L_{SF} : Faktor *load safety*
- F_1 : Berinilai 9 untuk sumbu tunggal dengan roda tunggal (STRT); 18 untuk sumbu tunggal dengan roda ganda (STRG); 18 untuk sumbu tandem dengan roda tunggal (STdRT); 36 untuk sumbu tandem dengan roda ganda (STdRG); 54 untuk sumbu tridem dengan roda ganda (STrRG); 72 untuk sumbu empat dengan roda ganda (SQdRG)

$$\log_{10}(F_2 N_e) = 14,524 - 6,777 \left[\max \left(0 \text{ atau } \left(\frac{P L_{SF}}{4,45 F_4} \right)^2 \frac{10^{F_3}}{41,35} - 9,0 \right) \right]^{0,103} \quad (5)$$

Keterangan:

- N_e : Jumlah beban yang diizinkan
- F_2 : Penyesuaian untuk efek pada sisi pelat, 0,06 untuk pelat dengan bahu bukan beton serta 0,94 untuk pelat dengan bahu beton.
- F_3 : Faktor *load safety*
- F_4 : Penyesuaian beban untuk erosi karena kelompok sumbu, 9 untuk sumbu tunggal dengan roda tunggal (STRT); 18 untuk sumbu tunggal dengan roda ganda (STRG); 18 untuk sumbu tandem dengan roda tunggal (STdRT); 36 untuk sumbu tandem dengan roda ganda (STdRG); 54 untuk sumbu tridem dengan roda ganda (STrRG); 54 untuk sumbu empat dengan roda ganda (SQdRG)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perencanaan Metode AASHTO 1993

Hasil perencanaan perkerasan kaku dengan parameter desain menggunakan metode AASHTO 1993 dirangkum pada Tabel 2. Perhitungan tebal pelat beton pada perkerasan kaku menggunakan metode AASHTO 1993 dihitung menggunakan Persamaan 1.

Tabel 2. Parameter perencanaan metode AASHTO 1993

Parameter Perencanaan	Nilai	Satuan
Umur rencana	40	tahun
CBR <i>subgrade</i>	6	%
Modulus resilien (MR)	9000	
Modulus reaksi tanah dasar (k)	463,92	psi
Realibilitas (R)	90	%
Standar deviasi normal (Z_R)	-1,282	
Standar deviasi (S_0)	0,30	
Indeks permukaan awal (p_o)	4,50	
Indeks permukaan akhir (p_i)	2,50	
<i>Serviceability loss</i> $\Delta PSI = p_o - p_i$	2,00	
Koefisien drainase (Cd)	1,00	
Koefisien transfer beban (J)	3,20	
Kuat tekan beton/ PCC <i>compressive strength</i> (f'_c)	5.334	psi
<i>Modulus of elasticity</i> beton $E_c = 57.000 \sqrt{f'_c}$	4.162.857	psi
<i>Modulus of rupture</i> (S'_c)	640,04	psi

Parameter perencanaan metode AASHTO 1993 dirangkum pada Tabel 2 berdasarkan standar AASHTO 1993 dan tipe perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan. Berdasarkan hasil perhitungan perencanaan metode AASHTO 1993, dengan umur rencana 40 tahun dan total kumulatif beban lalu lintas ekuivalen W_{18} sebesar 31.363.966 ESA, diperoleh kebutuhan tebal pelat beton (D) sebesar 12,60 inch atau 32,00 cm. Berdasarkan perhitungan bahwa, nilai k tanah dasar yang tinggi (463,92 psi) berkontribusi signifikan terhadap efisiensi tebal pelat. Tebal lapisan pondasi *lean concrete* yang direncanakan adalah 10,00 cm, berdasarkan perencanaan disarankan menggunakan lapis drainase 15,00 cm. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa ketebalan pelat 32,00 cm memberikan rasio keamanan struktural yang memadai, namun metode AASHTO 1993 yang bersifat empiris masih memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan pengaruh *gradien termal* dan interaksi dinamis antara pelat dan tanah dasar.

4.2 Perencanaan Metode Pd T-14-2003

Hasil perhitungan repetisi beban serta analisis *fatigue* dan erosi menggunakan metode Pd T-14-2003 dirangkum pada Tabel 3 dan Tabel 4. Perhitungan tebal pelat beton perkerasan kaku menggunakan metode Pd T-14-2003 mempertimbangkan iterasi desain dengan total kerusakan akibat *fatigue* dan erosi $\leq 100\%$.

Tabel 3. Hasil perhitungan repetisi beban yang terjadi pada perencanaan metode Pd T-14-2003

Jenis Sumbu	Beban Sumbu (Ton)	Jumlah Sumbu	Proporsi Beban	Proporsi Sumbu	JSKN Rencana	Repetisi Yang Terjadi
1	2	3	4	5	6	7 = 4x5x6
STRT	3	128,26	0,021	0,782	226.675.167	3.669.711
	3	2.235	0,361	0,782	226.675.167	63.946.699
	4	2.235	0,361	0,782	226.675.167	63.946.699
	6	0	0,000	0,782	226.675.167	0
	6	1.598	0,258	0,782	226.675.167	63.946.699
	6	0	0,000	0,782	226.675.167	0
	6	0	0,000	0,782	226.675.167	0
Total		6.196,26				177.284.282
STRG	6	128,26	1,000	0,016	226.675.167	3.669.711
	12	0	0,000	0,016	226.675.167	0
	9	0	0,000	0,016	226.675.167	0
	8	0	0,000	0,016	226.675.167	0
	8	0	0,000	0,016	226.675.167	0
Total		128,26				3.669.711
STdRG	19	1.598	1,000	0,202	226.675.167	45.721.174
	18	0	0,000	0,202	226.675.167	0
	18	0	0,000	0,202	226.675.167	0
Total		1.598				45.721.174
Kumulatif						226.675.167

Tabel 4. Hasil perhitungan analisis *fatigue* dan analisis erosi perencanaan metode Pd T-14-2003

Jenis Sumbu	Beban Sumbu (kN)	Repetisi yang Terjadi	Repetisi Yang Terjadi	Faktor Tegangan dan Erosi	Analisis <i>Fatigue</i> Repetisi Izin	Persentase Rusak (%) $7=4*100/6$	Analisis Erosi Repetisi Izin	Persentase Rusak (%) $9=4*100/8$
1	2	3	4	5	6		8	
STRT	30	18	3.669.711		TT	0,00	TT	0,00
	30	18	63.946.699		TT	0,00	TT	0,00
	50	30	63.946.699	TE = 0,5	TT	0,00	TT	0,00
	60	36	0	FRT = 0,11	TT	0,00	TT	0,00
	60	36	45.721.174	FE = 1,67	TT	0,00	TT	0,00
	60	36	0		TT	0,00	TT	0,00
	60	36	0		TT	0,00	TT	0,00
STRG	60	18	3.669.711		TT	0,00	TT	0,00
	120	36	0	TE = 0,84	TT	0,00	TT	0,00
	90	27	0	FRT = 0,19	TT	0,00	TT	0,00
	80	24	0	FE = 2,27	TT	0,00	TT	0,00
	80	24	0		TT	0,00	TT	0,00
STdRG	190	28,5	45.721.174	TE = 0,75	TT	0,00	100.000.000	45,72
	180	27	0	FRT = 0,17	TT	0,00	TT	0,00
	180	27	0	FE = 2,42	TT	0,00	TT	0,00
Total					0 % < 100%		45,72 % < 100%	

Berdasarkan hasil perhitungan JSKN rencana didapat 226.675.167 dengan repetisi beban terjadi sesuai Tabel 3, yaitu 177.284.282 pada STRT, 3.669.711 pada STRG, dan 45.721.174 pada STdRG. Nilai persentase kerusakan analisis *fatigue* < 100% dan analisis erosi 45,72 % < 100%, mengindikasikan bahwa tebal pelat yang direncanakan memadai secara struktural. Tebal perkerasan kaku metode Pd T-14-2003 diperoleh 30,00 cm dengan tebal lapisan pondasi beton kurus yang direncanakan adalah 10,00 cm. Metode Pd T-14-2003 memberikan hasil yang konservatif dengan mempertimbangkan efek gabungan antara analisis *fatigue* beton dan erosi pondasi. Secara keseluruhan, hasil perhitungan metode Pd T-14-2003 menunjukkan bahwa desain pelat beton mampu menahan beban lalu lintas selama umur rencana tanpa mengalami kerusakan *fatigue* maupun erosi berlebihan. Berdasarkan perencanaan yang dilakukan oleh [29] bahwa lapisan perkerasan menggunakan metode Pd T-14-2003 terdiri dari lapisan pelat beton dan lapisan fondasi bawah berupa lapisan beton kurus dengan analisis *fatigue* dan erosi yang sudah terpenuhi.

4.3 Perencanaan Metode MDP 2024

Hasil perhitungan repetisi beban serta analisis *fatigue* dan erosi menggunakan metode MDP 2024 dirangkum pada Tabel 5 sampai dengan Tabel 10. Jenis perencanaan perkerasan yang disesain yaitu perkerasan kaku JPCP dengan faktor keamanan beban sebesar 1,2. Pertimbangan utama yang diperhatikan dalam merencanakan tebal perkerasan jalan metode MDP adalah analisis *fatigue* pada perkerasan jalan dan analisis erosi lapisan fondasi bawah atau tanah dasar yang timbul akibat lendutan berulang. Perhitungan tebal pelat beton perkerasan kaku menggunakan metode MDP 2024 mempertimbangkan kerusakan *fatigue* dan erosi $\leq 100\%$.

Tabel 5. Hasil perhitungan faktor *fatigue* dan erosi – STRT

Beban Sumbu (kN)	Repetisi Beban L _{SF} (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Ekuivalensi Faktor 0,34		Ekuivalensi Faktor 1,30	
			<i>Fatigue</i>		Erosi	
			Analisis Faktor <i>Fatigue</i> Repetisi yang Diizinkan	<i>Fatigue</i> (%)	Analisis Faktor Erosi Repetisi yang Diizinkan	Kerusakan (%)
110	132	$2,7 \times 10^3$	<i>Unlimited</i>	0,00	$3,56 \times 10^{14}$	0,00
Total			<i>Fatigue</i> (%)	0,00	Erosi (%)	0,00

Tabel 6. Hasil perhitungan faktor *fatigue* dan erosi – STRG

Beban Sumbu (kN)	Repetisi Beban L_{SF} (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Ekuivalensi Faktor <i>Fatigue</i> Analisis Faktor <i>Fatigue</i> 0,57		Ekuivalensi Faktor Erosi 1,90	
			Repetisi yang Diizinkan	<i>Fatigue</i> (%)	Repetisi yang Diizinkan	Kerusakan (%)
150	180	$1,58 \times 10^6$	<i>Unlimited</i>	0,00	$9,37 \times 10^7$	1,69
160	192	$2,03 \times 10^3$	<i>Unlimited</i>	0,00	$1,73 \times 10^7$	0,01
Total			<i>Fatigue</i> (%)	0,00	Erosi (%)	1,70

Tabel 7. Hasil perhitungan faktor *fatigue* dan erosi – STdRT

Beban Sumbu (kN)	Repetisi Beban L_{SF} (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Ekuivalensi Faktor <i>Fatigue</i> Analisis Faktor <i>Fatigue</i> 0,34		Ekuivalensi Faktor Erosi 2,09	
			Repetisi yang Diizinkan	<i>Fatigue</i> (%)	Repetisi yang Diizinkan	Kerusakan (%)
120	144	$1,51 \times 10^6$	<i>Unlimited</i>	0,00	$3,56 \times 10^{14}$	1,34
130	156	$3,35 \times 10^5$	<i>Unlimited</i>	0,00	$1,13 \times 10^8$	2,36
140	168	$6,70 \times 10^5$	<i>Unlimited</i>	0,00	$5,05 \times 10^6$	13,29
150	180	$1,84 \times 10^6$	<i>Unlimited</i>	0,00	$2,43 \times 10^6$	75,79
Total			<i>Fatigue</i> (%)	0,00	Erosi (%)	92,77

Tabel 8. Hasil perhitungan faktor *fatigue* dan erosi – STdRG

Beban Sumbu (kN)	Repetisi Beban L_{SF} (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Ekuivalensi Faktor <i>Fatigue</i> Analisis Faktor <i>Fatigue</i> 0,51		Ekuivalensi Faktor Erosi 2,09	
			Repetisi yang Diizinkan	<i>Fatigue</i> (%)	Repetisi yang Diizinkan	Kerusakan (%)
310	372	0,00	<i>Unlimited</i>	0,00	$1,80 \times 10^6$	0,00
Total			<i>Fatigue</i> (%)	0,00	Erosi (%)	0,00

Tabel 9. Hasil perhitungan faktor *fatigue* dan erosi – STrRG

Beban Sumbu (kN)	Repetisi Beban L_{SF} (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Ekuivalensi Faktor <i>Fatigue</i> Analisis Faktor <i>Fatigue</i> 0,38		Ekuivalensi Faktor Erosi 2,16	
			Repetisi yang Diizinkan	<i>Fatigue</i> (%)	Repetisi yang Diizinkan	Kerusakan (%)
370	444	0,00	<i>Unlimited</i>	0,00	$9,70 \times 10^6$	0,00
Total			<i>Fatigue</i> (%)	0,00	Erosi (%)	0,00

Tabel 10. Hasil perhitungan faktor *fatigue* dan erosi – SQdRG

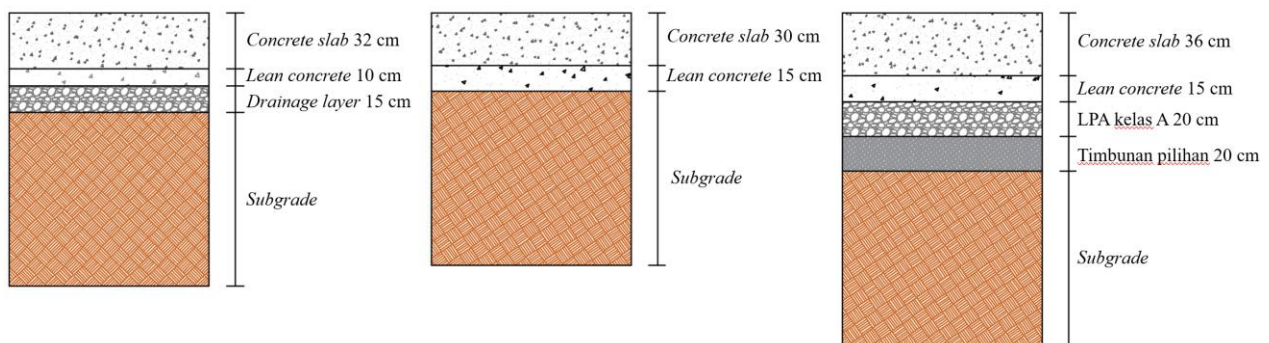
Beban Sumbu (kN)	Repetisi Beban L_{SF} (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Ekuivalensi Faktor <i>Fatigue</i> Analisis Faktor <i>Fatigue</i> 0,38		Ekuivalensi Faktor Erosi 2,16	
			Repetisi yang Diizinkan	<i>Fatigue</i> (%)	Repetisi yang Diizinkan	Kerusakan (%)
30	36	0,00	<i>Unlimited</i>	0,00	$3,56 \times 10^{14}$	0,00
Total			<i>Fatigue</i> (%)	0,00	Erosi (%)	0,00

Berdasarkan rekapitulasi hasil analisis Tabel 5 sampai dengan Tabel 10, tebal beton yang memadai untuk dilintasi oleh beban lalu lintas pada desain perkerasan kaku ini adalah 360 mm (total faktor *fatigue* sebesar 0% dan faktor erosi 92,75%). Hasil analisis pada seluruh kelompok sumbu (STRT, STRG, STdRT, STdRG, STrRG, dan SQdRG) menunjukkan nilai *fatigue* sebesar 0%, yang berarti tegangan lentur maksimum yang timbul pada pelat beton berada jauh di bawah *fatigue*. Kondisi ini menandakan bahwa desain pelat beton memiliki margin keamanan yang tinggi terhadap potensi retak lentur akibat pembebanan

berulang. Berbeda dengan *fatigue*, hasil analisis erosi menunjukkan variasi yang lebih signifikan antar kelompok sumbu. Nilai kerusakan erosi terbesar ditemukan pada kelompok STdRT dengan 92,77%, sedangkan kelompok sumbu lainnya menunjukkan nilai antara 0–1,7%. Nilai mendekati 100% pada STdRT mengindikasikan bahwa potensi keausan lapisan fondasi bawah lebih dominan dibanding retak lentur pelat beton, terutama pada daerah sambungan antar pelat yang menerima repetisi beban besar.

4.4 Perbandingan Hasil Perencanaan Metode AASHTO 1993, Metode Pd T–14–2003 dan Metode MDP 2024

Hasil perbandingan antara tiga metode perencanaan menunjukkan bahwa setiap pendekatan memiliki karakteristik dan asumsi desain yang berbeda, baik dari sisi dasar teoritis, parameter input, maupun tingkat konservatif terhadap kerusakan struktural perkerasan kaku. Gambaran lapisan dan tebal perkerasan jalan kaku dari perbandingan ketiga metode dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lapisan perkerasan jalan kaku: (a) metode AASHTO 1993, (b) metode Pd T–14–2003, (c) metode MDP 2024

Hasil Metode AASHTO 1993 merupakan metode empiris–mekanistik yang menghubungkan kinerja perkerasan dengan data hasil uji jalan AASHO Road Test. Pada penelitian ini, metode AASHTO 1993 menghasilkan tebal pelat beton sebesar 32,00 cm, dengan nilai kumulatif beban lalu lintas ekuivalen (W_{18}) sebesar 31.363.966 ESA dan umur rencana 40 tahun. Metode Pd T–14–2003 yang dikembangkan oleh Depkimpraswil [15] merupakan adaptasi lokal dari pendekatan mekanistik–empiris yang mengintegrasikan analisis *fatigue* pelat beton dan erosi lapisan pondasi bawah secara iteratif. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh tebal pelat beton sebesar 30,00 cm dengan persentase kerusakan *fatigue* 0% dan erosi 45,72%, yang berarti desain telah memenuhi batas kumulatif $\leq 100\%$. Metode MDP 2024 mengusung pendekatan mekanistik empiris terintegrasi, yang mengkombinasikan analisis tegangan–regangan dengan faktor *fatigue* dan erosi pada sambungan antar pelat. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh tebal perkerasan 36,00 cm dengan total *fatigue* 0% dan erosi 92,77%. Ketebalan pelat beton pada hasil metode MDP 2024 menerapkan faktor keamanan beban sebesar 1,2 dan memperhitungkan beban berulang secara lebih realistis. Nilai erosi yang tinggi pada kelompok sumbu STdRT menunjukkan bahwa potensi keausan pada lapisan pondasi bawah atau pada lapisan tanah dasar.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis perbandingan metode AASHTO 1993, Pd T–14–2003, dan MDP 2024, diperoleh bahwa ketiga metode menghasilkan ketebalan pelat beton yang berbeda akibat variasi pendekatan dan tingkat konservatif desain. Metode AASHTO 1993 menghasilkan tebal pelat 32,00 cm dengan umur rencana 40 tahun dan kumulatif beban lalu lintas 31.363.966 ESA, menunjukkan efisiensi struktural yang baik berdasarkan data empiris uji lapangan. Metode Pd T–14–2003 memberikan hasil tebal pelat 30,00 cm dengan kerusakan *fatigue* 0% dan erosi 45,72%, menandakan desain yang optimal dengan tingkat keamanan yang masih dalam batas toleransi. Sementara itu, metode MDP 2024 menghasilkan tebal pelat

36,00 cm dengan nilai *fatigue* 0% dan erosi 92,77%, mencerminkan pendekatan yang lebih konservatif karena mempertimbangkan faktor keamanan beban dan analisis beban berulang secara lebih realistis. Secara keseluruhan, MDP 2024 dinilai paling adaptif terhadap kondisi aktual lalu lintas dan lingkungan di Indonesia karena mengintegrasikan analisis mekanistik empiris yang komprehensif, meskipun menghasilkan ketebalan yang lebih besar dibandingkan dua metode lainnya. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan *modelling* secara mekanistik menggunakan *software* seperti Cirly atau AASHTOWare Pavement ME Design serta penyesuaian parameter MDP 2024 terhadap berbagai jenis tanah dasar dan kondisi iklim di wilayah Indonesia agar hasil desain semakin akurat dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. H. Al-Qaili, A. I. Al-Mansour, H. Al-Soliman, and K. AlSharabi, "RNN-based pavement moduli prediction for flexible pavement design enhancement," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, pp. 1–12, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02811.
- [2] J. Kwon, Y. Seo, and A. Kaplan, "Assessment of Full-Depth Reclamation (FDR) pavement performance: A case study in Georgia," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. 1, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02910.
- [3] H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, C. W. Schwartz, and R. Li, "Sensitivity analysis frameworks for mechanistic-empirical pavement design of continuously reinforced concrete pavements," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 498–508, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.091.
- [4] S.-H. Kim, J.-Y. Park, and J.-H. Jeong, "Effect of temperature-induced load on airport concrete pavement behavior," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 182–187, Jan. 2014, doi: 10.1007/s12205-014-0056-7.
- [5] P. Babashamsi, N. I. Md Yusoff, H. Ceylan, N. G. Md Nor, and H. Salarzadeh Jenatabadi, "Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 241–254, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijprt.2016.08.004.
- [6] Y. Chen and J. Xue, "Sustainable urban freight: pavement, environmental, and economic impacts of heavy-duty electric trucks," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 149, pp. 1–7, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.trd.2025.105033.
- [7] G. White, "Comparing the Cost of Rigid and Flexible Aircraft Pavements Using a Parametric Whole of Life Cost Analysis," *Infrastructures (Basel)*, vol. 6, no. 8, p. 1, Aug. 2021, doi: 10.3390/infrastructures6080117.
- [8] Y. Koh *et al.*, "Performance prediction models for flexible and rigid pavements – state-of-the-practice review for implementation in North America," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 26, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1080/10298436.2025.2513454.
- [9] J. Sun, E. Oh, G. Chai, Z. Ma, D. E. L. Ong, and P. Bell, "A systematic review of structural design methods and nondestructive tests for airport pavements," *Constr Build Mater*, vol. 411, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134543.
- [10] A. H. Elbosraty, M. Bahr, and A. M. Ebid, "Cost optimization for flexible pavement on fine sand improved using palm fibers," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–10, May 2025, doi: 10.1038/s41598-025-02115-7.
- [11] I. P. C. Wibawa, I. M. A. Ariawan, and M. D. Ardana, "Influence of CBR Variations on Rigid Pavement Structural Design for Airport Service Roads," *Interdisciplinary Social Studies*, vol. 4, no. 4, pp. 746–757, Sep. 2025, doi: 10.55324/iss.v4i4.940.
- [12] H. H. Titi and M. G. Matar, "Estimating resilient modulus of base aggregates for mechanistic-empirical pavement design and performance evaluation," *Transportation Geotechnics*, vol. 17, pp. 141–153, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.trgeo.2018.09.014.
- [13] Z. Yang, L. Wang, D. Cao, Y. Miao, and H. Yang, "Structural optimization design of semi-rigid base asphalt pavement using modulus matching criterion and multi-indicator range analysis," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 11, no. 1, pp. 131–159, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jtte.2022.10.002.
- [14] B. Huang, Q. Pan, X. Chen, J. Hu, and S. Lv, "Integrated Design of Materials and Structures for Flexible Base Asphalt Pavement," *Materials*, vol. 18, no. 15, pp. 1–24, Jul. 2025, doi: 10.3390/ma18153602.

- [15] Depkimpraswil, *Pd T-14-2003 Perencanaan perkerasan jalan beton semen*. 2003.
- [16] Kementerian PUPR Dirjen Bina Marga, *Manual Desain Perkerasan Jalan 2024*. 2024.
- [17] N. Su, F. Xiao, J. Wang, and S. Amirkhanian, "Characterizations of base and subbase layers for Mechanistic-Empirical Pavement Design," *Constr Build Mater*, vol. 152, pp. 731–745, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.060.
- [18] O. C. Assogba, Y. Tan, X. Zhou, C. Zhang, and J. N. Anato, "Numerical investigation of the mechanical response of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load and nonlinear temperature gradient effect," *Constr Build Mater*, vol. 235, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117406.
- [19] P. Khamkhanpom, Q. P. Nguyen, V. C. La, X. Q. Le, and Q. T. Nguyen, "Mechanistic-Empirical pavement design method and applicability in Laos," *Transportation Research Procedia*, vol. 85, pp. 18–25, 2025, doi: 10.1016/j.trpro.2025.03.129.
- [20] C. W. Schwartz, R. Li, H. Ceylan, S. Kim, and K. Gopalakrishnan, "Global Sensitivity Analysis of Mechanistic–Empirical Performance Predictions for Flexible Pavements," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2368, no. 1, pp. 12–23, Jan. 2013, doi: 10.3141/2368-02.
- [21] H. Ceylan, K. Gopalakrishnan, S. Kim, C. W. Schwartz, and R. Li, "Global Sensitivity Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement Mechanistic–Empirical Performance Predictions," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2367, no. 1, pp. 113–122, Jan. 2013, doi: 10.3141/2367-12.
- [22] A. Azam *et al.*, "Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, pp. 1–12, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03062.
- [23] I. M. A. Ariawan and I. P. C. Wibawa, "Maximum and minimum asphalt pavement temperature models to determine asphalt type based on performance graded in tropical climate environments," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 20, no. 14, pp. 1063–1072, Oct. 2025, doi: 10.59018/0725123.
- [24] I. P. C. Wibawa, I. N. A. Thanaya, and I. M. A. Ariawan, "The influence of aggregate gradation properties on the characteristics of cold mix asphalt emulsion," *Journal of Infrastructure Planning and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 23–38, May 2025, doi: 10.22225/jipe.4.1.2025.23-38.
- [25] M. N. Prayudyanto, A. Alimuddin, and A. Suhendra, "Analisis Tebal Perkerasan Jalan dengan Metode AASHTO terhadap Kerusakan Ruas Jalan Cileungsi – Cinyongsong Udik, Kabupaten Bogor," *Jurnal Komposit*, vol. 7, no. 1, pp. 43–52, Feb. 2023, doi: 10.32832/komposit.v7i1.8062.
- [26] R. Rivaldo and F. R. Yamali, "Perencanaan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Ruas Jalan Hitam Ulu-Mentawak Di Kabupaten Merangin (Menggunakan Metode AASHTO 1993)," *Jurnal Talenta Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 35–41, Feb. 2022, doi: 10.33087/talentaipil.v5i1.95.
- [27] A. B. K. Suharso, B. F. Ananda, and U. Khatulistiani, "Perencanaan Perkerasan Kaku di Jalan Raya Lontar Kota Surabaya dengan Metode AASHTO 1993," *EXTRAPOLASI*, vol. 22, no. 01, pp. 23–36, May 2025, doi: 10.30996/ep.v22i01.11683.
- [28] Sumina and K. J. Priyanto, "Perbandingan Perencanaan Perkerasan Jalan Rigid Pavement Dengan Menggunakan Metode SNI Pd T-14-2003 dan NAASRA," *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 25, no. 2, pp. 50–61, Jul. 2020, doi: 10.36728/jtsa.v25i2.1075.
- [29] F. Juwita, D. N. Afni, and F. Hidayat, "Analisa Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Ruas Jalan Jabung – Sp. Labuhan Maringgai (Sta 15+650 – 16+650)," *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, vol. 7, no. 1, pp. 17–23, Apr. 2022, doi: 10.24967/teksis.v7i1.1591.
- [30] Supriyanti and Darmadi, "Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Pada Ruasjalan Pasir Putih Kelurahan Pasir Putih Kecamatan Sawangan Kota Depok," *JURNAL TEKNIK SIPIL-ARSITEKTUR*, vol. 22, no. 2, pp. 188–199, Nov. 2023, doi: 10.54564/jtsa.v22i2.161.
- [31] J. Nopriyus and Gusmulyani, "Analisis Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku Dengan Metode Manual Desain Perkerasan (MDP) Bina Marga 2017 (Studi Kasus Pada Ruas Jalan Pendidikan Simpang Tiga Kebun Nenas)," *JuPerSaTeK*, vol. 5, no. 2, pp. 181–186, 2022, doi: 10.36378/jupersatek.v5i2.2763.
- [32] R. Ardiansyah and T. Sudibyo, "Analisis Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku Lajur Pengganti pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Elevated," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 5, no. 1, pp. 17–30, May 2020, doi: 10.29244/jsil.5.1.17-30.

- [33] A. Hu, Q. Bai, L. Chen, S. Meng, Q. Li, and Z. Xu, "A review on empirical methods of pavement performance modeling," *Constr Build Mater*, vol. 342, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127968.
- [34] F. Ahmed, J. Thompson, D. Kim, N. Huynh, and E. Carroll, "Evaluation of pavement service life using AASHTO 1972 and mechanistic-empirical pavement design guides," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 46–61, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijtst.2021.11.004.
- [35] H. Li and L. Khazanovich, "Multi-gene genetic programming extension of AASHTO M-E for design of low-volume concrete pavements," *Journal of Road Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 252–266, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jreng.2022.08.002.
- [36] G. Kollaros and A. Athanasopoulou, "Influence of drainage on flexible road pavement design," *Research on Engineering Structures and Materials*, pp. 31–46, 2017, doi: 10.17515/resm2016.76ma0726.
- [37] A. M. Rahim and K. P. George, "Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 89–96, Jun. 2005, doi: 10.1080/10298430500131973.
- [38] J. M. Vandenbossche, F. Mu, and T. R. Burnham, "Comparison of measured vs. predicted performance of jointed plain concrete pavements using the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guideline," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 239–251, Jun. 2011, doi: 10.1080/10298436.2010.506536.
- [39] M. M. Shallal and E. S. Ahmed, "A Comparison between the Empirical and Mechanistic-Empirical Pavement Design Methods," *International Journal of Scientific Research and Management*, vol. 7, no. 07, pp. 261–267, Jul. 2019, doi: 10.18535/ijstrm/v7i7.ec01.
- [40] K. Tuleubekov and D. R. Brill, "Correlation between Subgrade Reaction Modulus and CBR for Airport Pavement Subgrades," in *T&A;DI Congress 2014*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, May 2014, pp. 813–822. doi: 10.1061/9780784413586.079.
- [41] D. S. Gedafa, J. Mulandi, M. Hossain, and G. Schieber, "Comparison of Pavement Design Using AASHTO 1993 and NCHRP Mechanistic-Empirical Pavement Design Guides," in *Transportation and Development Institute Congress 2011*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, Mar. 2011, pp. 538–547. doi: 10.1061/41167(398)52.
- [42] Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, 2nd Edition. Lexington, 2004.
- [43] Q. Li, D. X. Xiao, K. C. P. Wang, K. D. Hall, and Y. Qiu, "Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view," *Journal of Modern Transportation*, vol. 19, no. 2, pp. 114–133, Jun. 2011, doi: 10.1007/BF03325749.
- [44] G. Sabih and R. A. Tarefder, "Impact of variability of mechanical and thermal properties of concrete on predicted performance of jointed plain concrete pavements," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 436–444, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijprt.2016.09.005.
- [45] B. Snilsberg, R. G. Saba, and L. J. Bakloekk, "Further Development and Implementation of a Mechanistic-Empirical Design and Analysis System for Pavement Structures in Norway," in *Proceedings of the 10th TRA Conference, 2024, Dublin, Ireland, Volume 5: Smart Resilient Infrastructur*, 2025, pp. 181–187.
- [46] D. Tompkins, L. Johanneck, and L. Khazanovich, "State Design Procedure for Rigid Pavements Based on the AASHTO Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2524, no. 1, pp. 23–32, Jan. 2015, doi: 10.3141/2524-03.
- [47] X. Wu, S. Motaharitabari, M. Hossain, S. E. Kulesza, and N. Velasquez, "Concrete Pavement Design Analysis Using AASHTOWare Pavement Mechanistic-Empirical Design Software," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2678, no. 10, pp. 315–324, Oct. 2024, doi: 10.1177/03611981241233279.
- [48] G. R. Chehab, R. H. Chehade, L. Houssami, and R. Mrad, "Implementation Initiatives of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide in Countries with Insufficient Design Input Data – The Case of Lebanon," 2018, pp. 147–167. doi: 10.1007/978-3-319-61908-8_12.
- [49] Z. Wu, D. X. Xiao, and Z. Zhang, "Research Implementation of AASHTOWare Pavement ME Design in Louisiana," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2590, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2016, doi: 10.3141/2590-01.