

Analisis perkerasan metode Mekanistik-Empiris (M-E) menggunakan perangkat lunak KENPAVE dan WinJULEA: studi kasus ruas Jalan Koroulon-Joholanang

Muhamad Abdul Hadi^{1,*}, Saphira Ashya Aulia¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Mechanistic-Empirical
KENPAVE
WinJULEA
Pavement performance

Corresponding Author:

Muhamad Abdul Hadi
muhamad.abdul.hadi@uii.ac.id
c.id

Abstract

Road transportation is a vital infrastructure in supporting socio-economic connectivity, but its performance often declines due to excessive traffic loads, vehicle growth, and environmental factors. To predict pavement damage more rationally, a mechanistic-empirical (M-E) approach is used utilizing KENPAVE and WinJULEA software. This study analyzes the structural response of pavement on the Koroulon-Joholanang Road section (Sta. 0+00–1+00) as a case study, focusing on horizontal tensile strain at the base of the asphalt layer and vertical compressive strain over the subsoil which is associated with the potential for fatigue cracking, rutting, and permanent deformation damage. The results of the analysis showed that both software produced relatively similar damage predictions. The highest horizontal strain values were obtained at 0.0004524 (KENPAVE) and 0.0004527 (WinJULEA), while the highest vertical strain was 0.0005964 (KENPAVE) and 0.0005960 (WinJULEA). Based on the equation, initial damage is estimated to follow the sequence of rutting → permanent deformation → fatigue cracking, with the first ages occurring at 372,435–373,556 ESAL (rutting), 599,703–601,710 ESAL (permanent deformation), and 6,635,281–6,652,551 ESAL (fatigue fractures). These findings confirm that the combination of KENPAVE and WinJULEA can be a complementary approach in predicting pavement performance as well as providing a scientific basis for more effective road design and maintenance strategies.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Transportasi jalan merupakan salah satu infrastruktur vital dalam mendukung konektivitas sosial dan ekonomi suatu daerah. Seiring meningkatnya mobilitas masyarakat dan aktivitas distribusi barang, kebutuhan akan jalan yang andal, aman, dan berkelanjutan menjadi semakin penting. Namun, pada kenyataannya, banyak ruas jalan yang mengalami penurunan kinerja akibat kelebihan beban di luar kapasitas desain

(Hadi, 2023), pesatnya pertumbuhan volume kendaraan (Faritzie dkk., 2019), serta faktor lingkungan yang mempercepat kerusakan (El-Ashwah dkk., 2021). Jika tidak ditangani dengan segera, masalah ini dapat secara signifikan mengurangi kualitas layanan jalan.

Menurut Huang (2004), dalam konteks desain dan evaluasi struktur jalan, metode empiris konvensional dianggap tidak cukup untuk menjelaskan hubungan antara sifat mekanik material dan perilaku kerusakan yang diamati di lapangan. Akibatnya, pendekatan mekanistik-empiris (M-E) semakin banyak

diadopsi baik dalam penelitian maupun praktik rekayasa perkerasan, seperti penerapan M-E menggunakan KENPAVE seperti yang dilansir oleh Gabriela & Nataadmadja (2021), Hadi & Fauziah (2022), Marlina dkk. (2023), Kurniawan & Hadi (2024), dan Mukheef dkk. (2024). Pendekatan ini memungkinkan analisis berdasarkan tekanan kritis dan regangan pada titik-titik penting struktur perkerasan, yang mengarah pada prediksi masa pakai yang lebih rasional dibandingkan dengan metode empiris murni. Namun, perlu dicatat bahwa alat analisis berbasis ME tidak terbatas pada KENPAVE; ada beberapa alat lain, seperti WinJULEA (*Windows Layered Elastic Analysis*).

WinJULEA adalah program perangkat lunak yang dirancang untuk menghitung respons struktural perkerasan di bawah beban lalu lintas (Erlingsson & Ahmed, 2013). Perangkat lunak ini mampu memperkirakan regangan tarik horizontal pada bagian bawah lapisan aspal serta regangan tekan vertikal pada lapisan tanah dasar (*subgrade*), yang merupakan parameter penting dalam mengevaluasi potensi terjadinya retak leleh dan deformasi permanen pada struktur perkerasan. Beberapa penelitian oleh Alaye dkk. (2022), Roja dkk. (2023), dan Hernandez dkk. (2024), telah menunjukkan bahwa WinJULEA memberikan prediksi yang andal tentang kehidupan kelelahan dan kehidupan bergegas dalam struktur trotoar.

Karakteristik lalu lintas Indonesia menunjukkan bahwa penggunaan WinJULEA dalam analisis desain perkerasan berbasis mekanistik masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai penerapan perangkat lunak tersebut yang diintegrasikan dengan KENPAVE melalui studi kasus pada ruas jalan tertentu di Indonesia untuk menyelidiki lebih lanjut penerapannya. Ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta. 0+00–1+00) dipilih sebagai lokasi studi kasus untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Ruas jalan ini berstatus sebagai jalan provinsi yang secara administratif terletak di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan berbatasan langsung dengan

Kabupaten Klaten di sebelah barat. Berfungsi sebagai jalur alternatif yang menghubungkan kedua kabupaten dan provinsi, Jalan Koroulon–Joholanang memberikan tingkat pelayanan yang relatif tinggi. Selain melayani pergerakan kendaraan pribadi, Jalan Koroulon–Joholanang juga merupakan jalur utama bagi kendaraan berat yang mengangkut material hasil erupsi Gunung Merapi menuju Klaten, Surakarta, dan wilayah sekitarnya. Di samping itu, jalan ini berfungsi sebagai koridor distribusi ekonomi yang menghubungkan Daerah Istimewa Yogyakarta dengan Jawa Tengah, serta sebagai jalur alternatif menuju kawasan wisata Prambanan dan sekitarnya.

Tingginya intensitas lalu lintas, khususnya kendaraan berat, menjadikan ruas jalan ini penting untuk dikaji dari aspek kinerja struktural perkerasannya. Pemanfaatan perangkat lunak WinJULEA dan KENPAVE pada penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai respons struktural perkerasan pada ruas Jalan Koroulon–Joholanang. Hasil analisis yang diperoleh diharapkan dapat digunakan untuk memprediksi potensi kerusakan perkerasan serta menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan strategi perencanaan dan pemeliharaan perkerasan yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Metode Penelitian

Teknik pengumpulan data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis mekanistik dengan bantuan perangkat lunak WinJULEA dan KENPAVE. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teoritis yang relevan, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data sekunder pada ruas Jalan Koroulon–Joholanang sebagai objek penelitian. Data yang digunakan diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2023,

sebagaimana disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut ini.

Tabel 1. Data lalu lintas harian rata-rata (LHR)

Gol.	Jenis Kendaraan	LHR (kend/jam)
1	Sepeda motor	16609
2	Sedan, <i>Jeep</i>	1855
3	<i>Pick-up</i>	0
4	Truk 2-Gandar (Truk Ringan)	590
5a	Bus Kecil	0
5b	Bus Besar	0
6a	Truk 2-Gandar (Kargo Ringan)	930
7a	Truk 3-Gandar	0
7b	Truk <i>Trailer</i>	34
7c	Truk semi-trailer	0
8	Kendaraan Non-Bermotor	2

Sumber: PUPESDM D.I.Yogyakarta (2023)

Tabel 2. Tebal lapis perkerasan

Lapis Perkerasan	Ketebalan (cm)
AC-WC	4
AC-BC	6
LFA	40
<i>Subgrade</i>	-

Sumber: PUPESDM D.I.Yogyakarta (2023)

Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan data pendukung yang bersumber dari Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017. Penggunaan MDPJ 2017 dipilih karena sesuai dengan periode perencanaan awal ruas jalan yang ditinjau, sehingga dinilai lebih representatif dibandingkan ketentuan terbaru yang mengacu pada MDPJ 2024. Adapun data pendukung yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Data Pendukung

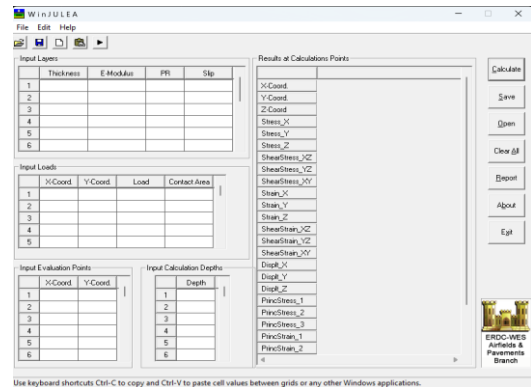
Lapis Perkerasan	Modulus Elastisitas (MPa)	Poisson Ration
AC-WC	1100	0,40
AC-BC	1200	0,40
LFA	150	0,35
<i>Subgrade</i>	60	0,45

Sumber: MDPJ (2017)

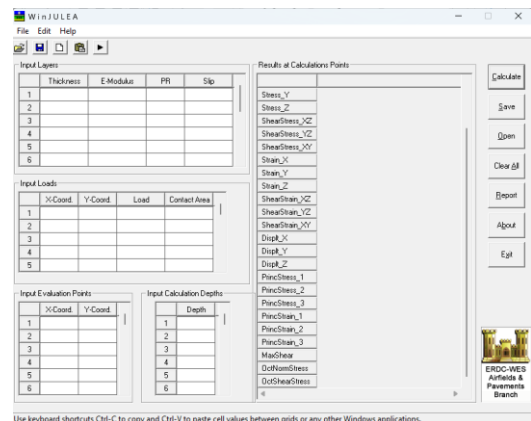
Perangkat lunak WinJULEA

Setelah data yang disajikan pada Tabel 1 hingga Tabel 3 diperoleh, data tersebut selanjutnya digunakan sebagai data masukan

(input) pada perangkat lunak WinJULEA dan KENPAVE. Tampilan awal perangkat lunak WinJULEA sebelum proses pemasukan data dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 berikut ini.



Gambar 1. Tampilan awal WinJULEA (Bagian 1)



Gambar 2. Tampilan awal WinJULEA (Bagian 2)

Proses rinci pemasukan data ke dalam perangkat lunak WinJULEA dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Input layers

Pada bagian ini, data yang dimasukkan meliputi tebal lapisan perkerasan, modulus elastisitas, *poisson ratio*, dan nilai *slip*. Pada halaman utama WinJULEA terdapat petunjuk bahwa nilai *slip* diisi sebesar 0,0 apabila permukaan jalan dianggap kasar, sehingga tidak terjadi *slip* antarlapisan. Sebaliknya, apabila terjadi *slip* penuh, nilai *slip* diisi sebesar 100.000. WinJULEA ini mampu menganalisis struktur perkerasan hingga maksimum 16 lapisan.

2. *Input loads*

Bagian ini memerlukan empat parameter masukan, yaitu *X-Coord* (posisi beban pada sumbu X dalam satuan inci atau mm), *Y-Coord* (posisi beban pada sumbu sisi beban pada sumbu Y dalam satuan inci atau mm), *load* (gaya vertikal dalam satuan Newton), dan *contact area* (luas kontak antara ban dan permukaan perkerasan. Nilai luas kontak tidak dimasukkan secara langsung, melainkan dihitung berdasarkan beban roda dan tekanan kontak antara ban dengan permukaan perkerasan.

3. *Input evaluation points*

Pada tahap ini ditentukan titik-titik pada struktur perkerasan yang akan dianalisis akibat pengaruh beban kendaraan. Sebelum proses analisis dilakukan, lokasi titik yang akan digunakan untuk memperoleh hasil tegangan maupun regangan harus ditetapkan terlebih dahulu.

4. *Input calculation depth*

Bagian ini digunakan untuk menentukan kedalaman struktur yang akan dianalisis. Parameter ini memiliki peran penting dalam proses perencanaan karena dapat memengaruhi hasil analisis. Apabila kedalaman yang ditetapkan terlalu dangkal, regangan yang terjadi pada lapisan tanah dasar (*subgrade*) tidak dapat diamati, padahal parameter tersebut sangat penting dalam analisis *rutting*. Sebaliknya, penetapan kedalaman yang terlalu besar dapat memperlambat waktu komputasi, meskipun tingkat akurasi hasil analisis tetap dapat dipertahankan.

Setelah seluruh data selesai dimasukkan, perangkat lunak WinJULEA akan melakukan proses analisis dan menghasilkan berbagai parameter respons struktural perkerasan, yang meliputi:

1. *Coord X, Y, dan Z*

Menunjukkan koordinat titik tinjauan yang terdiri atas posisi horizontal pada sumbu X dan Y serta kedalaman vertikal pada sumbu Z yang diukur dari permukaan perkerasan.

2. *Stress X, Y, dan Z*

Menyajikan nilai tegangan pada arah sumbu X, Y, dan Z. Tegangan pada arah Z memiliki peranan penting dalam mengevaluasi besarnya tekanan yang diterima oleh lapisan tanah dasar (*subgrade*).

3. *Shear stress XZ, YZ, dan XY*

Menunjukkan besarnya tegangan geser yang terjadi pada bidang XZ, YZ, dan XY.

4. *Strain X, Y, dan Z*

Menyajikan nilai regangan pada arah sumbu X, Y, dan Z. Regangan pada arah Z umumnya digunakan untuk mengevaluasi regangan vertikal (*rutting*). Regangan sendiri merupakan perubahan relatif panjang suatu material akibat pengaruh beban terhadap panjang awalnya.

5. *Shear strain XZ, YZ, dan XY*

Menunjukkan nilai regangan geser yang terjadi pada bidang XZ, YZ, dan XY.

6. *Displacement X, Y, dan Z*

Menyajikan perpindahan titik tinjauan pada arah sumbu X, Y, dan Z akibat pembebanan. Parameter ini menggambarkan besarnya pergeseran yang dialami titik tersebut ketika menerima beban.

7. *Principal Stresses 1, 2, dan 3*

Menunjukkan tegangan utama maksimum, menengah, dan minimum yang bekerja pada suatu titik. Tegangan utama merupakan tegangan normal yang terjadi tanpa adanya komponen tegangan geser.

8. *Principal Strains 1, 2, dan 3*

Menyajikan regangan utama maksimum, menengah, dan minimum. Nilai *strains 1* sering digunakan sebagai parameter dalam evaluasi potensi retak tarik pada perkerasan.

9. *Max Shear*

Menunjukkan nilai tegangan geser maksimum yang dapat digunakan untuk menilai potensi kegagalan geser antar lapisan perkerasan.

10. *Octahedral normal stress*

Menunjukkan nilai rata-rata dari ketiga tegangan utama yang bekerja pada suatu titik.

11. *Octahedral shear stress*

Menunjukkan parameter tegangan geser yang umum digunakan dalam berbagai teori kegagalan material untuk mengevaluasi kondisi keruntuhan struktur.

Perangkat lunak KENPAVE

Tampilan awal perangkat lunak KENPAVE dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 berikut ini.



Gambar 3. Tampilan awal KENPAVE (Bagian 1)



Gambar 4. Tampilan awal KENPAVE (Bagian 2)

Proses pemasukan data ke dalam perangkat lunak KENPAVE dilakukan melalui beberapa tahapan berikut.

1. *LAYERINP*

Menu ini dipilih pada tahap awal proses *input* data, karena jenis perkerasan yang dianalisis adalah perkerasan lentur (*flexible pavement*).

2. *Input general*

Bagian ini berisi beberapa parameter umum yang harus diisi, meliputi MATL (jenis material setiap lapisan yang dinyatakan dalam bentuk kode numerik), NDAMA (jenis analisis kerusakan yang dipilih), DEL (tingkat ketelitian analisis dengan nilai bawaan 0,001), NL (jumlah lapisan perkerasan dengan maksimum 19 lapisan), serta NZ (jumlah koordinat Z yang digunakan dalam analisis).

3. *Input Zcoord*

Pada tahap ini dimasukkan nilai koordinat Z untuk setiap lapisan perkerasan. Koordinat tersebut mendefinisikan posisi batas atas dan batas bawah masing-masing lapisan dengan tingkat ketelitian yang tinggi.

4. *Input layer*

Bagian ini digunakan untuk memasukkan karakteristik setiap lapisan perkerasan yang akan dianalisis. Parameter TH menunjukkan tebal lapisan, sedangkan PR menyatakan nilai *poisson ratio* dari masing-masing lapisan.

5. *Input interface*

Menu ini berkaitan dengan parameter NBOND yang telah ditentukan pada menu *general*. Apabila nilai NBOND diatur menjadi 1, maka menu *interface* menjadi *default* dan tidak dapat diakses. Namun, apabila NBOND diatur menjadi 2, maka data *interface* harus ditentukan.

6. *Input moduli*

Jumlah periode yang dimasukkan pada menu ini harus sesuai dengan nilai NPY yang telah ditentukan pada menu *general*. Jumlah maksimum periode yang dapat dimasukkan adalah 12. Parameter E menunjukkan modulus elastisitas masing-masing lapis perkerasan.

7. *Input load*

Jumlah kelompok beban yang dimasukkan pada menu ini harus sesuai dengan nilai NLG yang telah ditentukan pada menu *general*. Beberapa parameter yang perlu diisi meliputi: kolom *load*, yang menunjukkan konfigurasi sumbu kendaraan, yaitu nilai 0 untuk sumbu roda tunggal, nilai 1 untuk sumbu tunggal roda

ganda, nilai 2 untuk sumbu tandem, dan nilai 3 untuk sumbu tridem. Kolom CR menunjukkan jari-jari bidang kontak (*contact radius*), sedangkan CP menunjukkan besar beban yang bekerja. Kolom YW dan XW masing-masing menyatakan jarak antar roda pada arah sumbu Y dan X. Selanjutnya, parameter NR atau NPT digunakan untuk menentukan koordinat titik yang akan dianalisis guna memperoleh nilai tegangan dan regangan pada struktur perkerasan.

8. KENLAYER

Menu KENLAYER digunakan untuk memperoleh hasil analisis respons struktural perkerasan berupa tegangan, regangan, dan lendutan yang kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja perkerasan,

Evaluasi kinerja perkerasan

Respons struktural perkerasan yang diperoleh dari analisis menggunakan perangkat lunak WinJULEA dan KENPAVE selanjutnya dievaluasi menggunakan Pers. (1) hingga Pers. (3) yang disediakan dalam pedoman Asphalt Institute (1982) seperti berikut ini.

$$N_f = 0,0796 \times \epsilon_t^{-3,921} \times E^{-0,854} \quad (1)$$

dengan,

N_f = Jumlah repetisi beban hingga terjadinya kegagalan untuk mengendalikan kerusakan *fatigue cracking* (ESAL),

ϵ_t = Regangan tarik yang terjadi pada bagian bawah lapisan permukaan (cm), dan

E = Modulus elastisitas lapisan permukaan (kPa).

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_c^{-4,47} \quad (2)$$

dengan,

N_r = Jumlah repetisi beban hingga terjadinya kegagalan untuk mengendalikan kerusakan *rutting* (ESAL), dan

ϵ_c = Regangan tekan vertikal yang terjadi pada bagian atas lapisan tanah dasar (cm).

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_c^{-4,47} \quad (2)$$

dengan,

N_d = Jumlah repetisi beban hingga terjadinya kegagalan untuk mengendalikan kerusakan *permanent deformation* (ESAL), dan

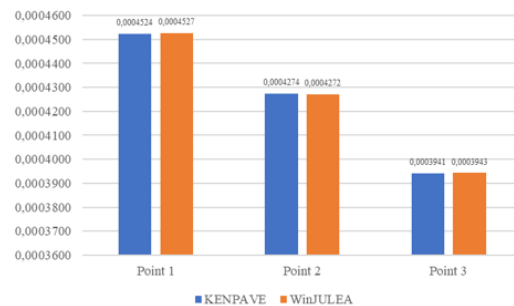
ϵ_c = Regangan tekan vertikal yang terjadi pada bagian atas lapisan tanah dasar (cm).

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh hasil dan pembahasan sebagai berikut.

Fatigue cracking (N_f)

Grafik hasil analisis respons perkerasan untuk potensi kerusakan retak lelah (*fatigue cracking*) yang dinyatakan sebagai nilai N_f berdasarkan hasil analisis menggunakan WinJULEA dan KENPAVE dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



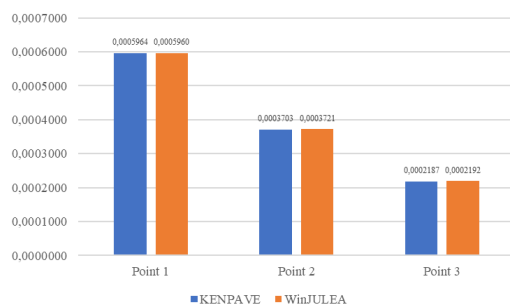
Gambar 5. Respons regangan tarik horizontal untuk potensi kerusakan *fatigue cracking* (N_f)

Berdasarkan Gambar 5, diketahui bahwa nilai regangan tarik horizontal tertinggi yang digunakan sebagai indikator potensi kerusakan *fatigue cracking* (N_f) hasil analisis menggunakan perangkat lunak KENPAVE sebesar 0,0004524, sedangkan hasil analisis menggunakan WinJULEA sebesar 0,0004527. Selanjutnya, dengan menggunakan Pers. (1), dapat diperkirakan bahwa ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta.

0+00–1+00) akan mulai mengalami kerusakan *fatigue cracking* pada saat akumulasi beban lalu lintas mencapai 6.652.551 ESAL berdasarkan hasil analisis KENPAVE dan 6.635.281 ESAL berdasarkan hasil analisis WinJULEA.

Rutting (Nr)

Grafik hasil analisis respons perkerasan untuk potensi kerusakan *rutting* (Nr) yang diperoleh menggunakan WinJULEA dan KENPAVE dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.

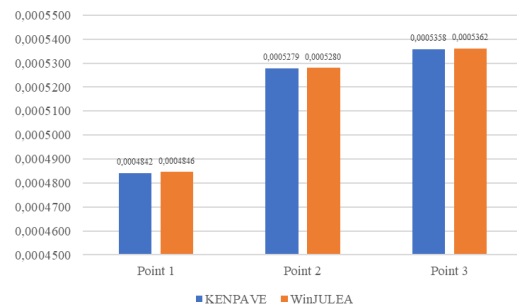


Gambar 6. Respons regangan tekan vertikal terhadap potensi kerusakan *rutting* (Nr)

Berdasarkan Gambar 6, dapat dilihat bahwa nilai regangan tekan vertikal maksimum yang diperoleh dari analisis menggunakan KENPAVE dan WinJULEA masing-masing sebesar 0,0005964 dan 0,0005960. Nilai regangan tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan potensi kerusakan *rutting* (Nr) menggunakan Pers. (2). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta. 0+00–1+00) diperkirakan mulai mengalami kerusakan *rutting* pada saat akumulasi beban lalu lintas mencapai 372.435 ESAL berdasarkan analisis KENPAVE dan 373.556 ESAL berdasarkan analisis WinJULEA.

Permanent deformation (Nd)

Grafik hasil analisis respons perkerasan untuk potensi kerusakan *permanent deformation* (Nd) yang diperoleh menggunakan WinJULEA dan KENPAVE dapat dilihat pada Gambar 7 berikut ini.

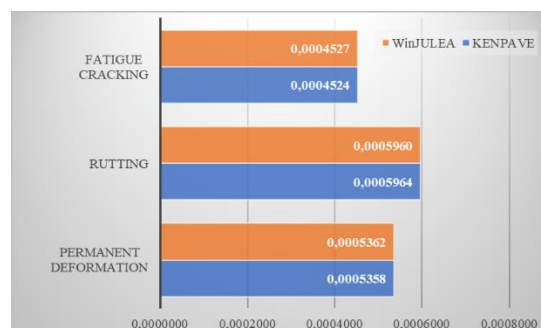


Gambar 7. Respons regangan tekan vertikal terhadap potensi kerusakan *permanent deformation* (Nd)

Berdasarkan Gambar 7, dapat diketahui bahwa nilai regangan tekan vertikal maksimum hasil analisis KENPAVE dan WinJULEA masing-masing sebesar 0,0005358 dan 0,0005362. Berdasarkan nilai tersebut dan mengacu pada Pers. (3), potensi kerusakan deformasi permanen (*permanent deformation*) (Nd) pada ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta. 0+00–1+00) diperkirakan mulai terjadi ketika akumulasi beban lalu lintas mencapai 601.710 ESAL untuk hasil analisis KENPAVE dan 599.703 ESAL untuk hasil analisis WinJULEA.

Perbandingan respons struktural perkerasan secara keseluruhan

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan pada Gambar 5 hingga Gambar 7, diperoleh perbandingan respons struktural perkerasan berupa nilai maksimum untuk masing-masing potensi kerusakan pada ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta. 0+00–1+00), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Perbandingan respons struktural perkerasan (nilai maksimum) untuk berbagai potensi kerusakan

Kerusakan pada perkerasan lentur umumnya berkembang secara bertahap sebagai respons terhadap repetisi beban lalu lintas dan pengaruh kondisi lingkungan terhadap material penyusun perkerasan. Berdasarkan Gambar 8, hasil analisis menunjukkan bahwa urutan kerusakan yang diprediksi terjadi pada ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta. 0+00–1+00) diawali oleh *rutting*, kemudian diikuti oleh *permanent deformation*, dan selanjutnya diikuti oleh *fatigue cracking*.

Rutting sering kali menjadi bentuk kerusakan awal yang muncul pada perkerasan. Kerusakan ini ditandai oleh terbentuknya cekungan atau alur pada jalur roda akibat deformasi plastis permanen, baik pada lapisan aspal maupun pada lapis fondasi atas. Proses tersebut dapat terjadi dalam waktu yang relatif cepat, karena campuran aspal memiliki sifat viskoelastis (bisa kembali ke bentuk semula seiring waktu) dan viskoplastis (tidak bisa kembali ke bentuk semula). Akibatnya, ruas jalan yang dilalui oleh beban berat lalu lintas secara berulang, terutama pada kondisi temperatur tinggi, dapat menyebabkan terjadinya aliran plastis pada material perkerasan jalan, sehingga memicu terjadinya deformasi pada permukaan jalan (Zhuang dkk., 2023).

Seiring bertambahnya repetisi beban lalu lintas, deformasi yang pada awalnya hanya terjadi pada lapisan permukaan akan berkembang menjadi deformasi permanen yang mempengaruhi struktur perkerasan secara lebih mendalam. Kondisi ini terjadi akibat melemahnya ikatan antara aspal dan agregat serta pergeseran butiran agregat pada lapisan yang lebih bawah, sehingga kemampuan struktur perkerasan dalam menahan beban lalu lintas menjadi semakin berkurang secara signifikan (Alamnie dkk., 2022). Hal tersebut menunjukkan bahwa *rutting* dan deformasi permanen merupakan dua tahapan kerusakan yang saling berkaitan dalam mekanisme deformasi plastis pada perkerasan.

Tahap kerusakan berikutnya yang umumnya muncul adalah retak lelah (*fatigue cracking*).

Kerusakan ini tidak terjadi secara langsung pada awal masa pelayanan perkerasan, melainkan berkembang secara bertahap akibat akumulasi tegangan dan regangan yang berulang, sehingga memicu terbentuknya retak-retak mikro pada lapisan aspal. Seiring dengan meningkatnya jumlah repetisi beban lalu lintas, retak mikro tersebut akan terus berkembang menjadi retak makro yang membentuk pola retak kulit buaya (*alligator cracking*) ketika jumlah siklus pembebanan lalu lintas telah melampaui batas ketahanan lelah material (Amini dkk., 2022). Berbeda dengan kerusakan *rutting* yang dapat terjadi secara cepat akibat plastisitas material, *fatigue cracking* membutuhkan waktu yang lebih lama untuk terjadi, karena sangat dipengaruhi oleh besarnya akumulasi dan frekuensi pembebanan yang diterima struktur perkerasan.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang dilakukan dengan menggunakan kombinasi perangkat lunak WinJULEA dan KENPAVE, kedua metode tersebut menghasilkan prediksi tingkat kerentanan kerusakan perkerasan yang relatif serupa. Hasil analisis menunjukkan bahwa ruas Jalan Koroulon–Joholanang (Sta. 0+00 – 1+00) diperkirakan mengalami pola kerusakan yang diawali oleh kerusakan *rutting*, kemudian diikuti dengan kerusakan *deformasi permanen* dan terakhir kerusakan *fatigue cracking*. Hal ini terjadi seiring dengan meningkatnya akumulasi beban lalu lintas yang dinyatakan dalam ESAL.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan dapat mengintegrasikan berbagai perangkat lunak berbasis metode mekanistik-empiris (M–E) guna memperluas pemanfaatan serta meningkatkan pemahaman terhadap penerapan metode tersebut dalam analisis kinerja perkerasan jalan.

Daftar Pustaka

Alamnie, M. M., Taddesse, E., & Hoff, I. (2022). Advances in permanent deformation modeling of

- asphalt concrete A review. *Materials*, 15(10), 3480. <https://doi.org/10.3390/ma15103480>
- Alaye, Q. E. A., Alaye, H. M., & Chabi, C. (2022). Structural model performance and reinforced pavement technology in unstable location in South Republic of Benin (West Africa). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.03.004>
- Amini, N., Hayati, P., & Latifi, H. (2023). Evaluation of rutting and fatigue behavior of modified asphalt binders with nanocomposite phase change materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(3), 678–692.
- Asphalt Institute. (1982). *Research and development of the Asphalt Institute's thickness design manual (MS-1) (9th ed.)*. Asphalt Institute.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). *Manual desain perkerasan jalan (Revisi Juni 2017) Nomor 04/SE/Db/2017*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- El-Ashwah, A. S., El-Badawy, S. M., & Gabr, A. R. (2021). A simplified mechanistic-empirical flexible pavement design method for moderate to hot climate regions. *Sustainability*, 13(19), 10760. <https://doi.org/10.3390/su131910760>
- Erlingsson, S., & Ahmed, A. (2013). Fast layered elastic response program for the analysis of flexible pavement structures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 196–210. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.757558>
- Faritzie, H. A., Djohan, B., & Wijaya, B. (2019). Pengaruh volume kendaraan terhadap tingkat kerusakan jalan pada perkerasan lentur (Flexible Pavement). *Jurnal Teknik Sipil UNPAL*, 9(2), 100–107.
- Gabriela, S., & Nataadmadja, A. D. (2021). Rigid pavement optimization by using empirical mechanistic method and Kenpave software. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 794, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.
- Hadi, M. A. (2023). Identifikasi kerentanan kinerja perkerasan jalan terhadap aktivitas overload kendaraan menggunakan program KENPAVE. Siklus: *Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 95–104. <https://doi.org/10.31849/siklus.v9i2.15081>
- Hadi, M. A., & Fauziah, M. (2022). Studi komparasi prediksi umur pelayanan antara campuran Superpave dan AC-WC menggunakan permodelan viskoelastik dan elastik. *Teknisia*, 27(2), 71–82. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol27.iss2.art1>
- Hernandez, J., Jayme, A., Ozer, H., Levenberg, E., Khazanovich, L., & Kutay, E. M. (2024). Verification and validation of pavement models. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 150(4), 04024044. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1517>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Education.
- Kurniawan, D., & Hadi, M. A. (2024). Kolaborasi metode empiris dan mekanistik-empiris guna identifikasi dan evaluasi kinerja perkerasan jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 14(2), 373–386. <https://doi.org/10.29103/tj.v14i2.1112>
- Marlina, E., Frans, J. H., & Nasjono, J. K. (2023). Analisis tebal perkerasan lentur dengan metode Bina Marga 2017 dan program KENPAVE. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 173–184.
- Mukheef, I. A., Al-Kremy, A. R. I. A., & Jawad, I. T. (2024). Studying the effect of improving the weak subgrade by use halloysite nanotubes on the performance of pavement layers using the Kenpave program. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 32(2), 177–188. <https://doi.org/10.29196/g7sd5c57>
- Roja, K. L., Yamani, H., Sadeq, M., & Masad, E. (2023). Analysis of performance of asphalt pavements in Qatar using mechanistic-empirical approaches. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01708. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01708>
- Zhuang, S., Wang, J., Li, M., Yang, C., Chen, J., Zhang, X., Zhao, Z., Li, D., & Ren, J. (2023). Rutting and fatigue resistance of high-modulus asphalt mixture considering the combined effects of moisture content and temperature. *Buildings*, 13(7), 1608. <https://doi.org/10.3390/buildings13071608>