# Analisis Modulus Elastisitas dan Sisa Masa Layan Struktural Perkerasan Lentur dengan Metode Mekanistik-Empirik

I.A. Saputri[1], M.R.F. Amrozi[1]*, L.B. Suparma[2]
[1]Magister Sistem Teknik dan Transportasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA
[2]Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA
**Corresponding author:* fahmi.amrozi@ugm.ac.id

## INTISARI

Ruas jalan Congot–Ngremang di Kabupaten Kulon Progo merupakan jalur kolektor primer pendukung JJLS yang menghubungkan pesisir selatan dengan pusat ekonomi Yogyakarta dan Purworejo. Dalam beberapa tahun terakhir, kondisi perkerasannya menurun dan termasuk kategori rawan kecelakaan (*blacklink*). Kondisi ini mengindikasikan umur layan jalan telah mendekati batas rencana desain. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan sisa masa layan perkerasan sebagai dasar dalam menetapkan alternatif penanganan kerusakan jalan yang efektif dan sesuai dengan kondisi struktur perkerasan. Metode penelitian ini menggunakan analisis *backcalculation* dengan ELMOD 7 berbasis data defleksi *Falling Weight Deflectometer* (FWD) untuk memperoleh modulus elastisitas tiap lapisan, yang selanjutnya digunakan dalam evaluasi sisa masa layan melalui pendekatan mekanistik–empirik. Analisis dengan ELMOD 7 menunjukkan modulus 843,6 MPa (HMA), 260,7 MPa (*base*), dan 83,9 MPa (*subgrade*). Evaluasi mekanistik–empirik menggunakan KENPAVE memprediksi keruntuhan struktural pada tahun ke-2 dengan sisa umur layanan sekitar 1 tahun akibat repetisi beban lalu lintas.

Kata kunci: masa layan; analisis *backcalculation*; ELMOD 7; mekanistik-empirik.

## 1 PENDAHULUAN

Jalan merupakan bagian prasarana transportasi darat yang berperan penting dalam mendukung mobilitas manusia, distribusi barang dan jasa serta penggerak utama dalam pembangunan ekonomi dan sosial pada suatu wilayah. Peningkatan kualitas jalan dapat berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas dan aksesibilitas di suatu wilayah (Litman, 2011). Kinerja jalan yang baik, dapat menurunkan hambatan perjalanan dan mempercepat waktu tempuh antar daerah terutama pada daerah berkembang (Wibowo & Triatmodjo, 2018). Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) sebagai pusat pendidikan dan destinasi wisata menghadapi tantangan serupa yaitu meningkatnya beban lalu lintas akibat pertumbuhan kendaraan yang meningkat secara signifikan sementara tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas dan kualitas jalan (Ma'arif & Nugroho, 2019).

Ruas Jalan Congot–Ngremang merupakan salah satu jalan provinsi di Kabupaten Kulon Progo yang berperan penting sebagai jalur kolektor primer yang menghubungkan wilayah pesisir selatan dengan pusat kegiatan ekonomi dan pariwisata di Yogyakarta serta Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah. Jalan ini juga berfungsi sebagai akses pendukung Jalur Lintas Selatan (JJLS) yang menjadi koridor utama pengembangan wilayah selatan DIY. Namun, dalam beberapa tahun terakhir kondisi fisik ruas jalan Congot–Ngremang mengalami penurunan kualitas perkerasan yang cukup signifikan. Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya kerusakan fungsional seperti *raveling*, retak memanjang, dan lubang (*potholes*) pada lapisan aus jalan. Menurut hasil kajian yang dilakukan oleh (Dharma & Prihatmantyo, 2023) ruas ini termasuk dalam kategori daerah rawan kecelakaan (*blacklink*) dengan tingkat kecelakaan cukup tinggi, yang salah satu penyebabnya adalah penurunan kondisi permukaan jalan dan drainase yang tidak optimal. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa umur layan jalan kemungkinan besar telah mendekati batas rencana desainnya.

Penelitian ini menganalisis *backcalculated moduli* lapisan perkerasan menggunakan program ELMOD 7 berdasarkan data defleksi dari pengujian *Falling Weight Deflectometer* (FWD) untuk memperoleh parameter modulus elastisitas aktual tiap lapisan. Metode *backcalculation* sendiri merupakan pendekatan analitis yang

mengestimasi modulus lapisan perkerasan dengan mencocokkan respon lendutan terukur terhadap model teoritis sistem berlapis elastis. Nilai modulus hasil analisis tersebut selanjutnya digunakan sebagai *input* dalam evaluasi sisa masa layan menggunakan pendekatan mekanistik-empirik, yaitu metode yang menggabungkan respons mekanistik (tegangan dan regangan akibat beban lalu lintas) dengan model empiris kerusakan untuk memprediksi kinerja dan umur perkerasan.

## 2 METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada ruas jalan Congot–Ngremang, yang secara administratif terletak di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Ruas ini termasuk dalam jaringan jalan provinsi, dengan status sebagai jalan kolektor primer. Secara geografis, ruas ini menghubungkan Desa Congot di Kecamatan Temon di sisi barat dengan Desa Ngremang di Kecamatan Galur di sisi timur. Posisi ruas ini juga berdekatan dengan kawasan Pantai Congot, Bandara Yogyakarta International Airport (YIA), serta akses menuju Jalur Lintas Selatan (JJLS) dapat dilihat pada Gambar 1.




Gambar 1. Lokasi penelitian ruas jalan Congot-Ngremang (BBPJN, 2025)**.**

Tahapan awal penelitian ini dilakukan melalui pengumpulan data lapangan dan kajian literatur yang relevan terkait analisis mekanistik-empirik dengan program KENPAVE serta analisis *backcalculation* menggunakan program ELMOD 7. Data sekunder yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Tengah-Daerah Istimewa Yogyakarta. Data tersebut antara lain data pengujian *Falling Weight Deflectometer (*FWD*),* Peta lokasi dan jaringan jalan, Data struktur perkerasan jalan, material perkerasan dan data geometrik jalan, data lalu lintas seperti Lalu Lintas Harian Rata-Rata (LHR)

Analisis *backcalculation* dalam penelitian ini menggunakan program ELMOD 7 dengan parameter masukan berupa *seed moduli*, tebal tiap lapisan perkerasan, serta data lendutan hasil pengujian FWD. Nilai *seed moduli* untuk lapis HMA ditentukan berdasarkan referensi penelitian sebelumnya dengan mempertimbangkan temperatur perkerasan aktual dari hasil survei lapangan. Berdasarkan Huber (1994), temperatur yang digunakan dalam analisis desain perkerasan adalah temperatur pada kedalaman 20 mm dari permukaan. Karena temperatur pada kedalaman tersebut tidak sama dengan temperatur permukaan, maka diperlukan perhitungan koreksi temperatur menggunakan persamaan hubungan antara temperatur permukaan dan kedalaman lapisan (Persamaan 1).

$$Td = Tsurf\ (1 - 0,063d + 0,007d^2 - 0,0004d^3) \quad (1)$$

dimana $T_{surf}$ adalah temperatur *surface,* $T_d$ adalah temperatur perkerasan dan $d$ adalah kedalaman.

Nilai *seed moduli* pada lapis pondasi (*base*) ditentukan mengacu pada pedoman Federal Highway Administration (FHWA, 2017), sedangkan modulus lapis tanah dasar (*subgrade*) menggunakan nilai *Modulus Resilien* (MR) berdasarkan pendekatan AASHTO (1993) yang dihitung dengan persamaan 2

$$MR = 1500 \times CBR \quad (2)$$

Dengan $MR$ adalah modulus resilien dan $CBR$ adalah *California Bearing Ratio*.

Proses analisis pada program ELMOD 7 menerapkan pendekatan *deflection basin fit* untuk memperoleh parameter utama berupa nilai modulus elastisitas hasil *backcalculation*, rasio perbandingan lendutan, serta nilai *root mean square* (RMS). Dalam interpretasi hasil keluaran, parameter RMS menjadi indikator utama karena mencerminkan tingkat kesesuaian antara lendutan terukur (*measured deflection*) dan lendutan hasil perhitungan (*calculated deflection basin*). Berdasarkan pedoman Federal Highway Administration (FHWA, 2017) nilai RMS yang direkomendasikan berada pada kisaran 2–3% dari batas toleransi yang ditetapkan. Apabila nilai RMS melampaui kisaran tersebut, diperlukan evaluasi lanjutan dengan meninjau kewajaran nilai modulus yang diperoleh. Modulus dianggap masih rasional (*reasonable moduli*) apabila nilainya berada dalam rentang 0,25 hingga 5 kali nilai *seed moduli* yang digunakan sebagai asumsi awal dalam analisis. Nilai modulus yang telah tervalidasi selanjutnya diolah dalam analisis persentil setelah terlebih dahulu mengidentifikasi dan memisahkan data yang tergolong *outliers*. Mengacu pada (Wirawan, 2016), analisis persentil dilakukan dengan menentukan posisi persentil ke-x dalam urutan data serta menghitung nilai persentil ke-x tersebut menggunakan persamaan yang tercantum pada Persamaan (3) dan Persamaan (4).

$$L_{px} = \frac{x(n+1)}{100} \quad (3)$$

Dengan $Lpx$ adalah letak persentil ke-x, $x$ adalah persentil ke-x dan $n$ adalah jumlah data.

$$Px = x_i + k(x_{(i+1)} - x_i) \quad (4)$$

dengan $Px$ adalah persentil ke-x, $xi$ adalah nilai pada data ke-x, dan $k$ adalah bilangan pecahan atau desimal kurang dari 1.

Perhitungan *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL)* dalam analisis lalu lintas mengacu pada pedoman Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Tahun 2024, sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (5).

$$CESAL = (\Sigma LHR_{JK}\, x\, VDF_{JK})\, x\, 365\, x\, DD\, x\, DL\, x\, R \quad (5)$$

Dengan $LHR_{JK}$ adalah lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga, $VDF_{JK}$ adalah faktor ekuivalen beban (*vehicle* damage *factor*) tiap jenis kendaraan niaga, DD adalah faktor distribusi arah, DL adalah faktor distribusi lajur, CESAL adalah kumulatif beban sumbu standar ekuivalen selama umur rencana dan R adalah faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif

Pendekatan mekanistik-empirik pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan program KENPAVE yang menggunakan input berupa parameter mekanik material perkerasan dan konfigurasi beban kendaraan. Hasil analisis berupa respons struktur dalam bentuk nilai tegangan dan regangan pada titik-titik kritis lapisan perkerasan. Nilai regangan maksimum yang diperoleh kemudian digunakan untuk memperkirakan kemampuan struktur dalam menahan repetisi beban berdasarkan persamaan empiris dari *The Asphalt Institute* (1982), yang digunakan untuk mengevaluasi potensi kerusakan akibat *fatigue*, *rutting*, dan *permanent deformation* sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (6) dan (7).

$$Nf = 0,0796\, (\varepsilon t)^{-3,921} |E^*|^{-0,854} \quad (6)$$

dengan $N_f$ menyatakan jumlah pengulangan beban yang diizinkan hingga batas kegagalan akibat retak lelah (*fatigue*), $\varepsilon t$ merupakan regangan tarik maksimum yang terjadi pada dasar lapisan aspal, dan $E^*$ adalah modulus elastisitas dinamis dari lapisan permukaan perkerasan.

$$Nd = 1,365\, x\, 10^{-9} (\varepsilon c)^{-4,477} \quad (7)$$

dengan $N_d$ menyatakan jumlah pengulangan beban yang diizinkan hingga batas terjadinya deformasi permanen ataupun *rutting*, sedangkan εc adalah regangan tekan vertikal maksimum yang terjadi pada bagian atas lapisan tanah dasar akibat pembebanan lalu lintas.

Berdasarkan hasil analisis kerusakan, selanjutnya dihitung nilai *remaining life* (RL) dengan mengacu pada metode (AASHTO, 1993), sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (8).

$$RL = 100 - \left[1 - \left(\frac{N_p}{N_{1,5}}\right)\right] \quad (8)$$

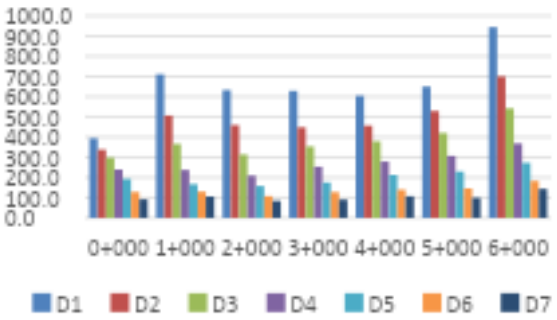
dengan RL menyatakan persentase sisa masa layan struktur perkerasan, $N_p$ adalah jumlah kumulatif beban lalu lintas yang telah dilayani hingga waktu peninjauan, dan $N1_{,5}$ merupakan jumlah kumulatif beban lalu lintas saat perkerasan diperkirakan mencapai batas kegagalan struktural.

## 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Analisis *Backcalculation* dengan Program ELMOD 7

#### 3.1.1 Data lendutan

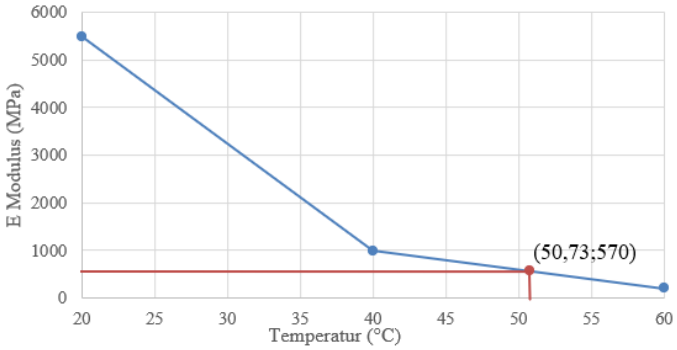
Visualisasi data lendutan hasil pengujian menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD) ditampilkan pada Gambar 1. Data tersebut menggambarkan respons struktural perkerasan akibat pembebanan dinamis, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis *backcalculation* untuk memperoleh nilai modulus elastisitas aktual tiap lapisan perkerasan.



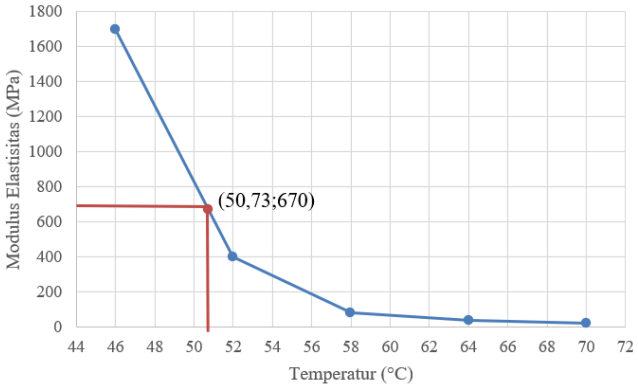

Gambar 2. Grafik lendutan ruas jalan Congot-Ngremang STA 0+000 hingga 6+000 (olah data penelitian, 2026)**.**

#### 3.1.2 Penentuan *seed moduli*

*Seed moduli* pada lapis HMA dilakukan dengan mempertimbangkan hubungan antara modulus elastisitas dan temperatur perkerasan berdasarkan hasil pengujian laboratorium. Pendekatan ini digunakan karena nilai *seed moduli* yang direkomendasikan dalam pedoman *Federal Highway Administration* (FHWA, 2017) berlaku untuk kondisi temperatur standar 25°C (77°F), sedangkan hasil survei lapangan menunjukkan bahwa temperatur permukaan perkerasan eksisting mencapai 54°C (129,2°F). Oleh karena itu, temperatur pada kedalaman lapisan dihitung menggunakan Persamaan (1) dengan memasukkan nilai Tsurf sebesar 129,2°F dan kedalaman (d) 0,7874 inch, sehingga diperoleh temperatur perkerasan (Td) sebesar 123,32°F atau sekitar 50,73°C. Selanjutnya, nilai *seed moduli* lapis HMA ditentukan melalui grafik hubungan modulus–temperatur berdasarkan penelitian Suparma (2001) dan Hadisi (2014) dengan acuan temperatur perkerasan 50,73°C, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.




Gambar 3. Grafik hubungan modulus elastisitas dengan temperatur (Suparma, 2001).




Gambar 4. Grafik hubungan modulus elastisitas dengan temperatur (Hadisi, 2014).

Berdasarkan grafik pada Gambar 2 dan 3, diperoleh nilai modulus elastisitas pada temperatur perkerasan 50,73°C sebesar 570 MPa dan 670 MPa. Rentang nilai tersebut kemudian digunakan sebagai batas bawah dan batas atas (*range*) *seed moduli* lapis HMA dalam input program ELMOD 7.

Untuk lapis pondasi (*base*), nilai *seed moduli* mengacu pada pedoman *Federal Highway Administration* (FHWA, 2017) untuk material *crushed stone or gravel sand*, dengan kisaran 200–345 MPa. Sementara itu, *seed moduli* lapis tanah dasar (*subgrade*) dihitung menggunakan Persamaan (2) berdasarkan pendekatan AASHTO (1993), dengan nilai CBR rencana minimum sebesar 6% sesuai *Manual Desain Perkerasan Jalan* (MDPJ, 2017). Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai *Modulus Resilien* (MR) sebesar 9000 psi atau sekitar 62 MPa.

3.1.3 Analisis program ELMOD 7

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan program ELMOD 7 dengan memasukkan nilai *seed moduli* yang telah ditentukan di atas, diperoleh keluaran berupa nilai *backcalculated* serta nilai RMS pada ruas jalan Congot-Ngremang. Rincian hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai *backcalculated moduli* ruas jalan Congot-Ngremang

| STA | Modulus Elastisitas | | | RMS (%) |
|---|---|---|---|---|
| | HMA (MPa) | *Base* (MPa) | *Subgrade* (MPa) | |
| 0+000 | 1036,9 | 659,2 | 87,1 | 10,16 |
| 1+000 | 808,7 | 161,8 | 139,8 | 6,64 |
| 2+000 | 959,6 | 184,4 | 132,9 | 5,8 |
| 3+000 | 843,6 | 260,7 | 77,9 | 6,53 |
| 4+000 | 817,9 | 368,2 | 83,9 | 11,06 |
| 5+000 | 937,5 | 274,1 | 53,3 | 10,69 |
| 6+000 | 794,2 | 125,6 | 67,2 | 5,29 |

Mengacu pada penelitian (Rahmawati, 2022), seluruh nilai *backcalculated moduli* tetap disertakan dalam analisis persentil meskipun tidak memenuhi kriteria RMS maupun *reasonable moduli*. Namun demikian, pada penelitian ini dilakukan pendekatan yang lebih selektif, yaitu hanya menggunakan nilai *backcalculated moduli* yang memenuhi kriteria *reasonable moduli* serta tidak termasuk dalam kategori *outliers*.Sehingga dilakukan *check reasonable moduli* yang tersaji pada Tabel 2

Tabel 2. Hasil pemeriksaan terhadap *reasonable moduli*

| STA | *Check Reasonable Moduli* |
|---|---|

| | HMA (MPa) | *Base* (MPa) | *Subgrade* (MPa) |
|---|---|---|---|
| 0+000 | *OK* | *OK* | *OK* |
| 1+000 | *OK* | *OK* | *OK* |
| 2+000 | *OK* | *OK* | *OK* |
| 3+000 | *OK* | *OK* | *OK* |
| 4+000 | *OK* | *OK* | *OK* |
| 5+000 | *OK* | *OK* | *OK* |
| 6+000 | *OK* | *OK* | *OK* |

Untuk memperoleh nilai modulus elastisitas yang representatif terhadap suatu ruas jalan, digunakan analisis persentil dengan memilih nilai P50 atau median. Pemilihan median dilakukan karena jumlah data relatif terbatas (≤ 10), sehingga nilai tengah dianggap lebih stabil dan mampu mewakili karakteristik data secara lebih objektif. Dilakukan analisis persentil menggunakan persamaan 3 dan 4 pata tiap lapis perkerasan. Hasil *backcalculated moduli* disajikan pada Tabel 3 berikut ini

Tabel 3. Rekapitulasi hasil $P_{50}$ *backcalculated moduli* tiap lapisan

| Modulus Elastisitas | | |
|---|---|---|
| HMA (MPa) | *Base* (MPa) | *Subgrade* (MPa) |
| 843,6 | 260,7 | 83,9 |

Setelah didapatkan nilai *backcalculated moduli* selanjutnya nilai ini akan digunakan sebagai input dalam program KENPAVE untuk menganalisis tegangan dan regangan yang terjadi.

3.2 Analisis Beban Lalu Lintas

Data lalu lintas pada ruas jalan Congot-Ngremang diperoleh sebagai data sekunder dari laporan Satuan Kerja P2JN DIY. Tahun awal analisis ditetapkan pada 2015, sedangkan data lalu lintas tersedia untuk tahun 2025, sehingga dilakukan penyesuaian ke tahun 2015 menggunakan faktor pertumbuhan lalu lintas (i) sebesar 5,3%. Dalam perhitungan digunakan faktor distribusi arah (DD) sebesar 0,5, faktor distribusi lajur (DL) sebesar 100%, serta faktor pertumbuhan kumulatif (R) sebesar 34,13. Nilai VDF 4 dan VDF 5 ditentukan berdasarkan klasifikasi masing-masing jenis kendaraan. Analisis lalu lintas dilakukan dengan menghitung CESA 4 dan CESA 5 mengacu pada MDPJ (2024) menggunakan Persamaan (5), dan hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perkiraan kumulatif beban lalu lintas

| Kelompok Kendaraan | Golongan Kendaraan | LHR | VDF 4 | VDF 5 | DD | DL | R | CESA 4 | CESA 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kelompok 1 | 1,2,3,4 | 23.183 | - | - | 0,5 | 1 | 34,13 | - | - |
| Kelompok 2 | 5A | 30 | - | - | 0,5 | 1 | 34,13 | - | - |
| Kelompok 3 | 5B | 95 | 1,2 | 1,3 | 0,5 | 1 | 34,13 | 710.158 | 769.337 |
| Kelompok 4 | 6A | 2.404 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 1 | 34,13 | 7.484.688 | 5.987.750 |
| Kelompok 5 | 6B | 69 | 1,1 | 1 | 0,5 | 1 | 34,13 | 465.963 | 423.603 |
| Kelompok 6 | 7A | 298 | 3,2 | 4 | 0,5 | 1 | 34,13 | 5.920.472 | 7.400.590 |
| Kelompok 7 | 7B | 4 | - | - | 0,5 | 1 | 34,13 | - | - |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kelompok 8 | 7C | 85 | 4,3 | 5,3 | 0,5 | 1 | 34,13 | 2.276.865 | 2.806.369 |
| | TOTAL | 26.168 | | | | | | 16.858.146 | 17.387.649 |

Selanjutnya, hasil rekapitulasi rencana jumlah kendaraan setiap tahun yang digunakan dalam perhitungan CESA tersebut disajikan pada Tabel 5. yang menggambarkan perkembangan beban lalu lintas selama periode analisis dan menjadi dasar dalam evaluasi kinerja jalan secara jangka panjang.

Tabel 5. Rekapitulasi rencana jumlah kendaraan setiap tahun

| Tahun Ke- | CESA 5 (ESAL) | Tahun Ke- | CESA 5 (ESAL) |
|---|---|---|---|
| 1 | 510.520 | 11 | 7.367.555 |
| 2 | 1.048.098 | 12 | 8.268.555 |
| 3 | 1.614.168 | 13 | 9.217.309 |
| 4 | 2.210.239 | 14 | 10.216.347 |
| 5 | 2.837.902 | 15 | 11.268.334 |
| 6 | 3.498.831 | 16 | 12.376.076 |
| 7 | 4.194.790 | 17 | 13.542.528 |
| 8 | 4.927.634 | 18 | 14.770.803 |
| 9 | 5.699.319 | 19 | 16.064.175 |
| 10 | 6.511.903 | 20 | 17.387.649 |

3.3 Analisis Mekanistik-Empirik dengan Program KENPAVE

3.3.1 Analisis pada program KENPAVE

Tahapan evaluasi perkerasan jalan menggunakan program KENPAVE, khususnya modul KENLAYER untuk menghitung tegangan dan regangan pada perkerasan lentur, dilakukan melalui beberapa langkah sistematis sebagai berikut.

*a. LAYERINP*

Tahap pertama dalam analisis perkerasan menggunakan program KENPAVE, khususnya modul KENLAYER, dilakukan melalui menu *LAYERINP*. Kemudian klik pada *menu file* lalu pilih *new* untuk memulai *input new data*.

b. *General*

Pada menu umum (*general)*, nilai-nilai yang di*input* disajikan pada Tabel 5.13 dan Gambar 5.6 berikut ini.

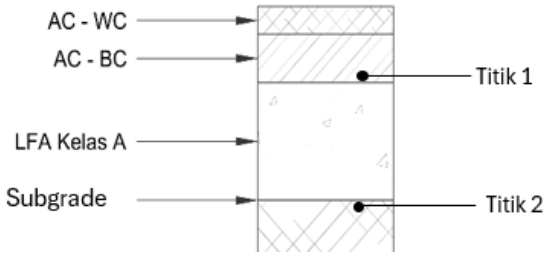
Tabel 6. Data *input* pada *menu general*

| Istilah | Nilai | Keterangan |
|---|---|---|
| *Tittle* | - | |
| MATL | 1 | Pada analisis perkerasan adalah *linier* |
| NDAMA | 0 | Tidak ada analisis kerusakan |
| NYP | 1 | Mengikuti KENPAVE |
| NLG | 1 | Mengikuti KENPAVE |
| DEL | 0,01 | Standar akurasi |
| NL | 4 | Jumlah lapisan perkerasan pada analisis adalah 4 (*surface, base, subbase,sugrade*) |
| NZ | 6 | Jumlah titik kerusakan yang analisis |
| ICL | 80 | Mengikuti KENPAVE |

| | | |
|---|---|---|
| NSDT | 9 | Untuk vertical displacement, nilai tegangan dan regangan |
| NBONT | 1 | Semua lapisan saling mengikat |
| NLBT | 0 | - |
| NLTC | 0 | - |
| NUNIT | 1 | Satuan digunakan adalah standar internasional (SI) |

*c. Zcoord*

Pada bagian *Zcoord* di program KENPAVE, dimasukkan nilai kedalaman dari titik-titik yang akan ditinjau dalam analisis *respons* struktur. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, titik-titik tersebut merepresentasikan posisi evaluasi di dalam sistem berlapis perkerasan.




Gambar 5. Posisi titik tinjauan

Berdasarkan Gambar 4, Titik 1 terletak pada bagian dasar lapisan HMA dan digunakan sebagai lokasi evaluasi untuk menganalisis potensi kerusakan akibat *fatigue cracking* serta kontribusinya terhadap *rutting*. Sementara itu, Titik 2 berada pada permukaan lapisan *subgrade* dan difungsikan sebagai titik tinjau untuk menganalisis potensi *permanent deformation* akibat regangan tekan vertikal yang terjadi di atas tanah dasar. Nilai kedalaman titik-titik evaluasi tersebut dimasukkan melalui menu *Zcoord* pada program KENPAVE. Rincian *input* kedalaman titik tinjau kerusakan disajikan pada Tabel 7

Tabel 7. Data *input* pada *menu zcoord*

| No | Kedalaman (cm) | Keterangan |
|---|---|---|
| 1 | 0 | Permukaan AC-WC |
| 2 | 4 | *Interface* Lapis AC-WC dan AC-BC |
| 3 | 9,998 | Titik Tinjau 1 |
| 4 | 10 | *Interface* Lapis AC-BC dan *Base* |
| 5 | 40 | Interface Lapis *Base* dan *Subgrade* |
| 6 | 40,002 | Titik Tinjau 2 |

*d. Layer*

Parameter yang di*input* ke dalam modul KENLAYER mencakup ketebalan masing-masing lapisan perkerasan serta nilai *rasio Poisson*. Nilai *rasio Poisson* mengacu pada rekomendasi FHWA (2017), sedangkan data ketebalan lapisan diperoleh dari data sekunder BBPJN Jawa Tengah - D.I. Yogyakarta. Rincian parameter tersebut disajikan pada Tabel 5.15 dan divisualisasikan pada Gambar 5.9.

Tabel 8. Data *input* pada *menu layer*

| *No. Layer* | *Thickness* (cm) | *Poisson's Ratio* |
|---|---|---|
| 1 | 4 | 0,35 |
| 2 | 6 | 0,35 |
| 3 | 30 | 0,35 |
| 4 | ∞ | 0,45 |

*e. Moduli*

Pada menu *Moduli*, nilai modulus elastisitas yang dimasukkan merupakan hasil *backcalculated moduli* dari analisis lendutan FWD menggunakan program ELMOD 7.

Tabel 9. Data *input* pada *menu moduli*

| *No. Layer* | *Layer* | Modulus Elastisitas (kPa) |
|---|---|---|
| 1 | AC-WC | 844000 |
| 2 | AC-BC | 844000 |
| 3 | *Base* | 261000 |
| 4 | *Subgrade* | 84000 |

f. *LOAD*

Selain parameter struktur, analisis pada program KENPAVE juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik pembebanan kendaraan dan mekanisme kontak roda terhadap permukaan perkerasan. Parameter yang didefinisikan meliputi tekanan ban (*tire pressure*), besar beban roda (*wheel load),* jari-jari bidang kontak (*contact radius*), luas area kontak (*contact area*), besarnya tekanan kontak aktual (*contact pressure*), serta jarak antar roda dalam satu sumbu (*tire spacing*).

Tabel 10. Data *input* pada *menu load*

| Nama *Input* | Nilai | Keterangan |
|---|---|---|
| LOAD | 1 | (*Single axle load*) digunakan beban sumbu standar 8,16 ton |
| CR | 11 cm | Berdasarkan nilai jarak antar ban |
| CP | 550 kPa | Berdasarkan nilai tekanan ban. |
| YW | 33 cm | *single axle with dual tires* |
| XW | 0 cm | *single axle with dual tires* |
| NR or NPT | 3 | tiga pengulangan beban dengan tinjauan berbeda |

Setelah seluruh data diinput dan disimpan, analisis dijalankan melalui menu KENLAYER pada program KENPAVE untuk memperoleh nilai tegangan dan regangan. Hasilnya dibuka melalui menu EDITOR, kemudian diambil nilai *vertical strain* pada kedalaman 9,998 cm dan 40,002 cm serta *horizontal strain* pada kedalaman 9,998 cm. Nilai regangan tersebut dikonversi ke bentuk absolut dan disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11 rekapitulasi *output* program KENLAYER ruas jalan Congot-Ngremang

| No. Pengulangan Beban | *Vertical Strain* Kedalaman 9,998 (cm) | *Horizontal Strain* Kedalaman 9,998 (cm) | *Vertical Strain* Kedalaman 40,002 (cm) |
|---|---|---|---|
| 1 | $5{,}377 \times 10^{-4}$ | $3{,}413 \times 10^{-4}$ | $4{,}870 \times 10^{-4}$ |
| 2 | $3{,}022 \times 10^{-4}$ | $3{,}089 \times 10^{-4}$ | $5{,}284 \times 10^{-4}$ |
| 3 | $1{,}381 \times 10^{-4}$ | $2{,}736 \times 10^{-4}$ | $5{,}342 \times 10^{-4}$ |
| Max | $5{,}377 \times 10^{-4}$ | $3{,}413 \times 10^{-4}$ | $5{,}342 \times 10^{-4}$ |

3.3.2 Analisis prediksi kerusakan

Nilai repetisi beban izin dihitung berdasarkan kerusakan *fatigue*, *rutting*, dan *permanent deformation* menggunakan Persamaan 6 dan 7 dengan input regangan maksimum pada Tabel 11. Hasilnya diperoleh repetisi beban izin sebesar 27.126.217 ESAL (*fatigue*), 592.250 ESAL (*rutting*), dan 609.821 ESAL (*permanent deformation*).

3.3.3 Analisis sisa masa layan perkerasan lentur

Dengan menggunakan nilai repetisi beban izin akibat *fatigue*, *rutting*, dan *permanent deformation*, nilai *remaining life* (RL) dihitung berdasarkan metode AASHTO (1993) menggunakan Persamaan 8. Pada tahun pertama diperoleh RL sebesar 98,12% (*fatigue*), 13,80% (*rutting*) dan 16,28% (*permanent deformation*). Perhitungan RL dilakukan setiap tahun hingga nilainya mencapai negatif sebagai indikasi kegagalan struktur, dan rekapitulasi tahun terjadinya *failure* pada jalan Congot-Ngremang disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Rekapitulasi sisa masa layan perkerasan lentur dan tahun keruntuhan (*failure)*

| *Fatigue Cracking* | | *Rutting* | | *Permanent Deformation* | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Failure* | Umur Sisa | *Failure* | Umur Sisa | *Failure* | Umur Sisa |
| 26 | 25 | 2 | 1 | 2 | 1 |

Dalam pendekatan *multi-distress*, umur pelayanan perkerasan ditentukan oleh jenis kerusakan yang paling dahulu melampaui batas kinerja, sehingga distress tercepat menjadi faktor pengendali (Lytton, 2003). Berdasarkan Tabel 12 pada ruas jalan Congot–Ngremang, kerusakan yang paling menentukan adalah *rutting* (deformasi permanen), yang diprediksi mencapai kondisi runtuh paling cepat, yaitu sekitar dua tahun dengan sisa umur terendah ±1 tahun.

## 4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *backcalculation* menggunakan program ELMOD 7 pada jalan Congot-Ngremang, diperoleh nilai modulus elastisitas sebesar 843,6 MPa untuk lapis HMA, 260,7 MPa untuk lapis *base* dan 83,9 MPa untuk lapis *subgrade.*

Analisis prediksi kerusakan *fatigue*, *rutting*, dan *permanent deformation* berdasarkan metode mekanistik-empirik menggunakan KENPAVE menunjukkan nilai *horizontal tensile strain* di bawah HMA sebesar 0,0003413 serta *vertical compressive strain* sebesar 0,0005377 (di bawah HMA) dan 0,0005342 (pada interface *base–subgrade*) pada ruas jalan Congot–Ngremang. Berdasarkan evaluasi tersebut, perkerasan diprediksi mengalami keruntuhan struktural pada tahun ke-2 dengan sisa umur layanan sekitar 1 tahun, ditentukan oleh mekanisme kerusakan paling kritis akibat repetisi beban lalu lintas.

## Referensi

AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

Departemen Pekerjaan Umum, 2024. *MANUAL DESAIN PERKERASAN JALAN No. 03/M/BM/2024*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.

Dharma, S., & Prihatmantyo. (2023). *Peningkatan Keselamatan pada Blacklink Daerah Rawan Kecelakaan (Studi Kasus Jalan Congot–Ngremang KM 2–KM 6 Kabupaten Kulon Progo)*.

FHWA. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic – Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation*. FHWA-HRT-16-011. Washington DC.

Huang, Y.H., 2004. *Pavement Analysis and Design*. Second. Pearson Education. Kentucky: Pearson Education.

Huber, G. a., 1994. Weather Database for the SUPERPAVE TM Mix Design System, (February), 139.

Litman, T. (2011). *Transportation and Economic Development*. Victoria Transport Policy Institute.

Lytton, R. L., 1989. *Backcalculation* of Pavement Layer Properties. American Society for Testing and Materials. STP 1026, pp. 7-38.

Lytton, R.L. 1989. *Backcalculation* of Pavement Layer Properties, Nondestructive Testing of Pavements and *Backcalculation* of Moduli, ASTM STP 1026, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Ma'arif, A., & Nugroho, D. (2019). Pertumbuhan Lalu Lintas dan Tekanan Infrastruktur Jalan di Provinsi DIY. *Jurnal Transportasi Dan Infrastruktur*, *5*(1), 22–30.

Rahmawati, R., 2022. Prediksi Kerusakan Dan Sisa Umur Perkerasan Lentur Dengan Metode Mekanistik - Empirik Dan *Backcalculation*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Suparma, L. (2021). *The Use of Recycled Waste Plastics in Bituminous Composites School of Civil Engineering*.

The Asphalt lnstitute, 1982. *The Asphalt Institute. 1982. Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1)*. 9th ed. Research Report 82-2. Lexington, KY: The Asphalt Institute.

Wibowo, A., & Triatmodjo, B. (2018). Evaluasi Kinerja Jalan di Wilayah Perdesaan sebagai Pendukung Distribusi Barang dan Jasa. *Jurnal Transportasi Terapan*, *2*(1), 35–42.

Wirawan, N., 2016. *Cara Mudah Memahami Statistika Ekonomi dan Bisnis (Statistika Deskriptif)*. Denpasar: Keraras Emas.