

## ANALISIS PERBANDINGAN DESAIN MEKANISTIK-EMPIRIS STRUKTUR PERKERASAN LENTUR DENGAN PEMODELAN ELASTIK DAN VISKOELASTIK : STUDI KASUS PADA RUAS JALAN MILIR-SENTOLO

Muh Iqbal Fajar Satria<sup>1</sup>, Berlian Kushari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Alumni Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Email: [muhiqbalfajarsatria@gmail.com](mailto:muhiqbalfajarsatria@gmail.com)

<sup>2</sup>Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Email: [bkushari@uii.ac.id](mailto:bkushari@uii.ac.id)

### ABSTRACT

Roads are land transportation infrastructure that plays an important role in the transportation sector, especially for the continuity of the distribution of goods and services as well as people. The existence of a good and useful transportation system is one of the important requirements for the development and improving the welfare of the community. Milir-Sentolo road is one of the routes that connects DIY Province with Central Java Province and supports the development of the Kulon Progo Regency area. In addition to supporting the economic sector of the Kulon Progo District, this road segment is also an access to Kulon Progo Airport from Yogyakarta Province. In designing the pavement structure of Milir-Sentolo road, data is collected from Satuan Kerja Pelaksana Jalan Nasional (P2JN). In this research, the pavement thickness was analyzed using the mechanistic empirical method namely KENPAVE program with elastic and viscoelastic modeling. After analyzing the KENPAVE program with elastic and viscoelastic modeling using the existing pavement AC-WC 4 cm, AC-BC 6 cm, AC-Base 20 cm and LPA class A 30 cm, the response of the axle load repetitions was 154,797,390 ESAL until permanent deformation damage happened with elastic model and 85,378,748 ESAL until permanent deformation damage happened with viscoelastic model. From the repetition of axle loads, the service life of the existing flexible pavement is up to 21 years until it's damaged by permanent deformation with the elastic modeling and for the viscoelastic modeling is only able to withstand up to 14 years until it's damaged by permanent deformation.

**Keywords :** Mechanistic-Empiric, Kenpave program, Damage

### PENDAHULUAN

Jalan Milir-Sentolo merupakan salah satu jalur yang menghubungkan Provinsi DIY dengan Provinsi Jawa Tengah dan mendukung pengembangan wilayah Kabupaten Kulon Progo. Selain untuk menunjang sektor ekonomi wilayah Kabupaten Kulon Progo, ruas jalan Milir-Sentolo juga menjadi akses menuju Bandara Kulon Progo dari Provinsi Yogyakarta serta Jawa Tengah.

Jalan Milir-Sentolo yang saat ini melayani lalu lintas harian rerata hingga mencapai 38.269 kendaraan/hari (P2JN 2017). Ruas jalan Milir-Sentolo juga merupakan jalan yang telah mengalami rekonstruksi pada tahun 2018. Struktur perkerasan ruas jalan ini merupakan perkerasan lentur dengan Lapis pondasi Atas 30 cm, AC-Base 20 cm, AC-BC 6 cm, AC-WC 4 cm. Setelah direkonstruksi, jalan ini diharapkan dapat menampung volume kendaraan yang lebih besar, khususnya setelah Bandara Kulon

Progo mulai beroperasi serta dapat menahan beban angkutan berat yang melintas.

Studi ini bertujuan untuk meninjau ulang hasil desain rekonstruksi ruas jalan Milir-Sentolo guna menjawab beberapa pertanyaan berikut: (1) Apakah desain perkerasan lentur eksisting (Bina Marga 2017) dapat mencapai umur rencana 20 tahun? (2) Pada jumlah repetisi beban dan tahun pelayanan keberapa perkerasan struktur eksisting (Bina Marga 2017) akan mengalami kerusakan retak lelah, deformasi menurut metode mekanistik empiris dengan pemodelan viskoelastik? (3) Pada jumlah repetisi beban dan tahun pelayanan keberapa perkerasan struktur eksisting (Bina Marga 2017) akan mengalami kerusakan retak lelah, deformasi menurut metode mekanistik empiris dengan pemodelan viskoelastik.

Sebuah metodologi dikembangkan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan di atas berdasarkan tinjauan analisis mekanistik-empiris dengan pendekatan teori sistem lapis banyak pada bagian mekanistiknya, lalu untuk fungsi empirisnya yaitu menggunakan fungsi transfer untuk mentransfer nilai-nilai regangan yang dihasilkan dari analisis mekanistik menjadi jumlah kumulatif lintasan beban gandar standar yang menyebabkan kerusakan retak lelah ( $N_f$ ) dan deformasi permanen ( $N_d$ ) pada perkerasan. Analisis mekanistik dilakukan dengan bantuan perangkat lunak KENPAVE, khususnya modul Kenlayer untuk perkerasan lentur (Huang, 2004).

Bagian selanjutnya dari jurnal ini adalah menjelaskan tentang metodologi dari mekanistik empiric, hasil analisis, pembahasan dan kesimpulan

## METODOLOGI

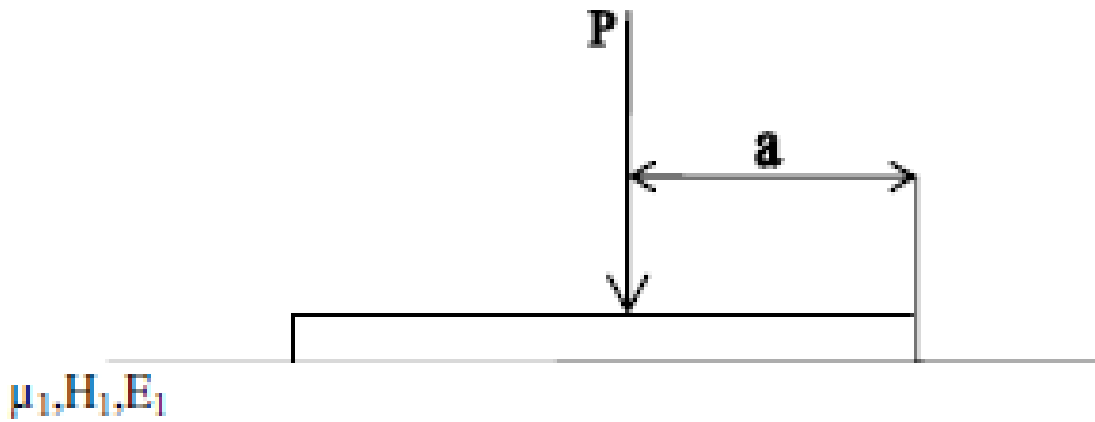
### Teori Sistem Lapis Banyak

Teori sistem lapis banyak adalah adalah konsep metode mekanistik dalam desain struktur perkerasan. Respon dari perkerasan sendiri yaitu tegangan, regangan dan lendutan sebagai sistem struktur multi lapisan terhadap beban roda kendaraan. Pada metode mekanistik sistem lapis banyak sendiri merupakan salah satu sistem yang penyelesaiannya secara analisis. Solusi sistem berlapis ini pertama kali dikembangkan oleh Burnister (1943) dengan sistem dua lapis dan diperpanjang oleh Burnister (1945) menjadi sistem tiga lapis. Dengan adanya kemampuan komputer, teori tersebut dapat di aplikasikan menjadi *multi-layered system* dengan berapapun jumlah lapisannya (Huang, 1967).

Terdapat tiga sistem dalam metode sistem lapis banyak yaitu sebagai berikut:

1. Sistem satu lapis

Dalam sistem struktur satu lapis, struktur perkerasan dianggap sebagai kesatuan struktur dengan bahan yang homogen.

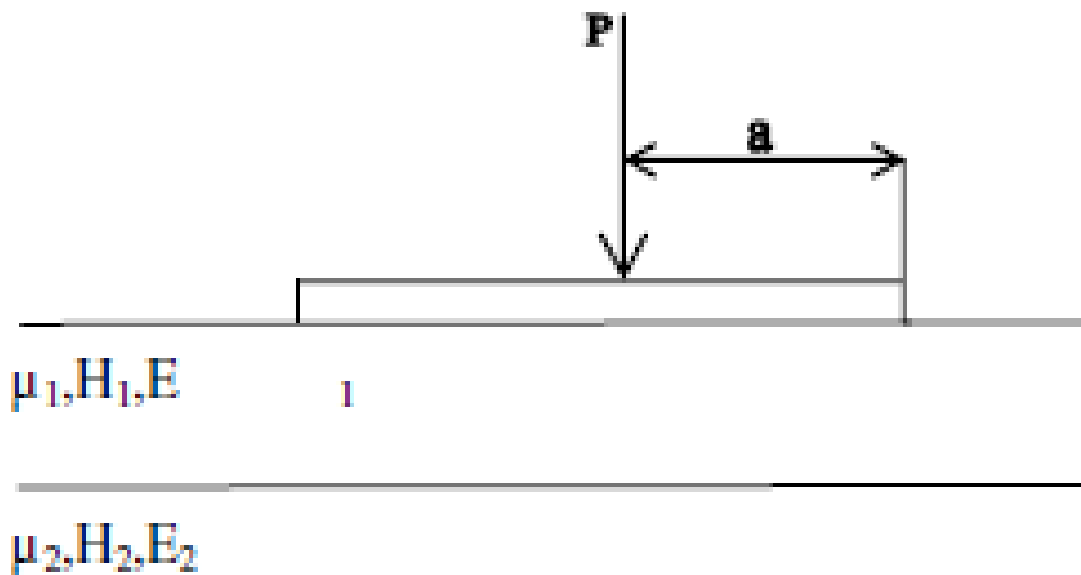


Gambar 1 Sistem satu lapis

2. Sistem dua lapis

Dalam pemecahan sistem dua lapis, beberapa asumsi dibuat batas dan kondisi sifat bahan, yaitu homogen, isotropik dan elastik. Sistem ini dimodelkan dengan membedakan tanah dasar dan lapisan perkerasan di atasnya, atau dengan kata lain membedakan lapisan aspal dan

lapisan agregat (termasuk tanah dasar). Lapisan permukaan diasumsikan tidak terbatas,, namun kedalamannya terbatas. Sedangkan lapisan bawahnya atau tanah dasar tidak terbatas baik arah horizontal maupun vertical.

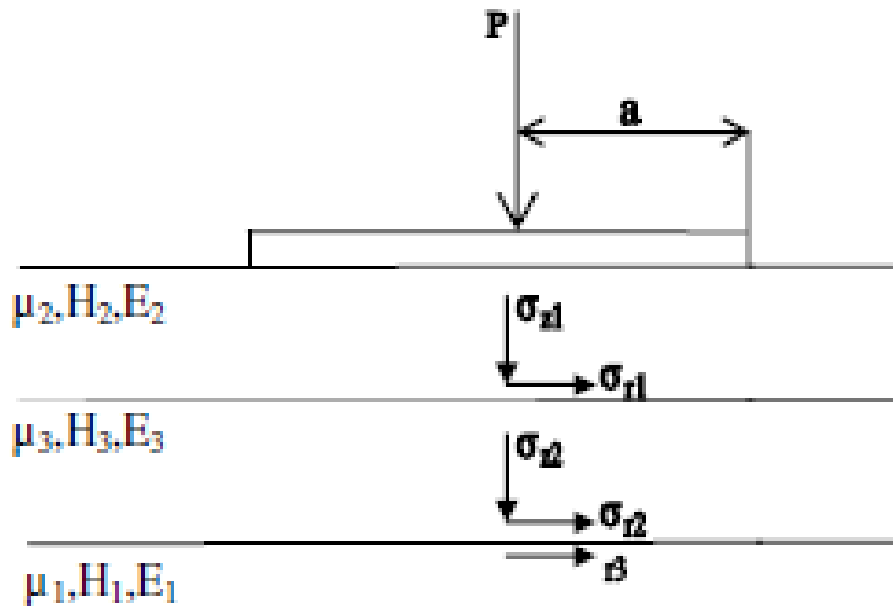


Gambar 2 Sistem dua lapis

3. Sistem tiga lapis

Sistem struktur tiga lapis dapat memodelkan lapisan aspal, lapisan agregat dan tanah dasar terpisah. Pemodelan ini, selain lebih mewakili

struktur perkerasan yang dibangun, juga dapat mempertimbangkan ketiga sifat bahan perkerasannya yang pada hakikatnya berbeda.



Gambar 3 Sistem tiga lapis

Input bagi model ini untuk mengkarakterisasi material perkerasan dan respon strukturnya meliputi: modulus elastisitas ( $E$ ) dan rasio *Poisson* ( $\mu$ ) setiap lapis, tebal tiap lapis ( $t$ ), serta kondisi pembebanan, yaitu besarnya, geometrinya, serta repetisinya. Sedangkan outputnya berupa: tegangan ( $\sigma$ ), regangan ( $\epsilon$ ), dan defleksi ( $\delta$ ). Aplikasi KENPAVE merupakan salah satu aplikasi yang digunakan untuk mengecek ketiga output tersebut pada seluruh bagian perkerasan. Namun demikian, pengecekan pada beberapa titik kritis (Tabel 1) umumnya dilakukan untuk memperdiksi kerusakan struktural perkerasan.

Tabel 1 Analisis titik-titik kritis pada struktur perkerasan

Lokasi titik	Respon struktur	Kegunaan
Bagian bawah pada lapis beraspal	Regangan tarik arah horizontal ( $\epsilon_t$ )	Memprediksi kerusakan retak lelah pada lapis beraspal
Bagian atas lapis pondasi atas ( <i>base</i> ) atau lapis pondasi bawah ( <i>subbase</i> )	Regangan desak arah vertikal ( $\epsilon_c$ )	Memprediksi kerusakan alur pada lapis pondasi atas atau bawah
Bagian atas lapis tanah dasar ( <i>subgrade</i> )	Regangan desak arah vertikal ( $\epsilon_c$ )	Memprediksi deformasi pada tanah dasar

### Fungsi Transfer

Bagian empiris dari analisis mekanistik-empiris mentransfer respon struktur tertentu (Tabel 1) akibat beban menjadi kriteria kerusakan, yaitu jumlah repetisi beban yang menyebabkan kerusakan struktural tertentu. Fungsi transfer menurut *The Asphalt Institute* terbagi menjadi retak lelah ( $N_f$ ) dan retak deformasi permanen ( $N_d$ ).

#### 1. Retak Lelah (*Fatigue Cracking*)

Untuk mengetahui jumlah repetisi beban berdasarkan persamaan retak lelah sebagai berikut:

$$N_f = f_1 (\varepsilon_t)^{f_2} (E_1)^{f_3} \quad (1)$$

Dengan

$N_f$  =Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *fatigue cracking*

$f_1$  =Nilai yang diperoleh dari pengujian lelah (*fatigue*) di laboratorium. Untuk nilainya menurut *Asphalt Institute* yaitu 0,0796

$f_2$  =Nilai yang diperoleh dari pengujian lelah (*fatigue*) di laboratorium. Untuk nilainya menurut *Asphalt Institute* yaitu 3,921

$f_3$  =Nilai yang diperoleh dari pengujian lelah (*fatigue*) di laboratorium. Untuk nilainya menurut *Asphalt Institute* yaitu 0,854

$\varepsilon_t$  =Regangan tarik pada bagian bawah lapisan *AC-Base*

$E$  =Modulus Elastis pada lapis permukaan atau lapis *HMA*

#### 2. Retak Deformasi Permanen (*Permanent Deformation*)

Untuk mengetahui jumlah repetisi beban berdasarkan persamaan retak deformasi permanen sebagai berikut:

$$N_d = f_4 (\varepsilon_t)^{-f_5} \quad (2)$$

Dengan

$N_d$  =Jumlah nilai repetisi beban yang diijinkan untuk mengontrol *permanent deformation*,

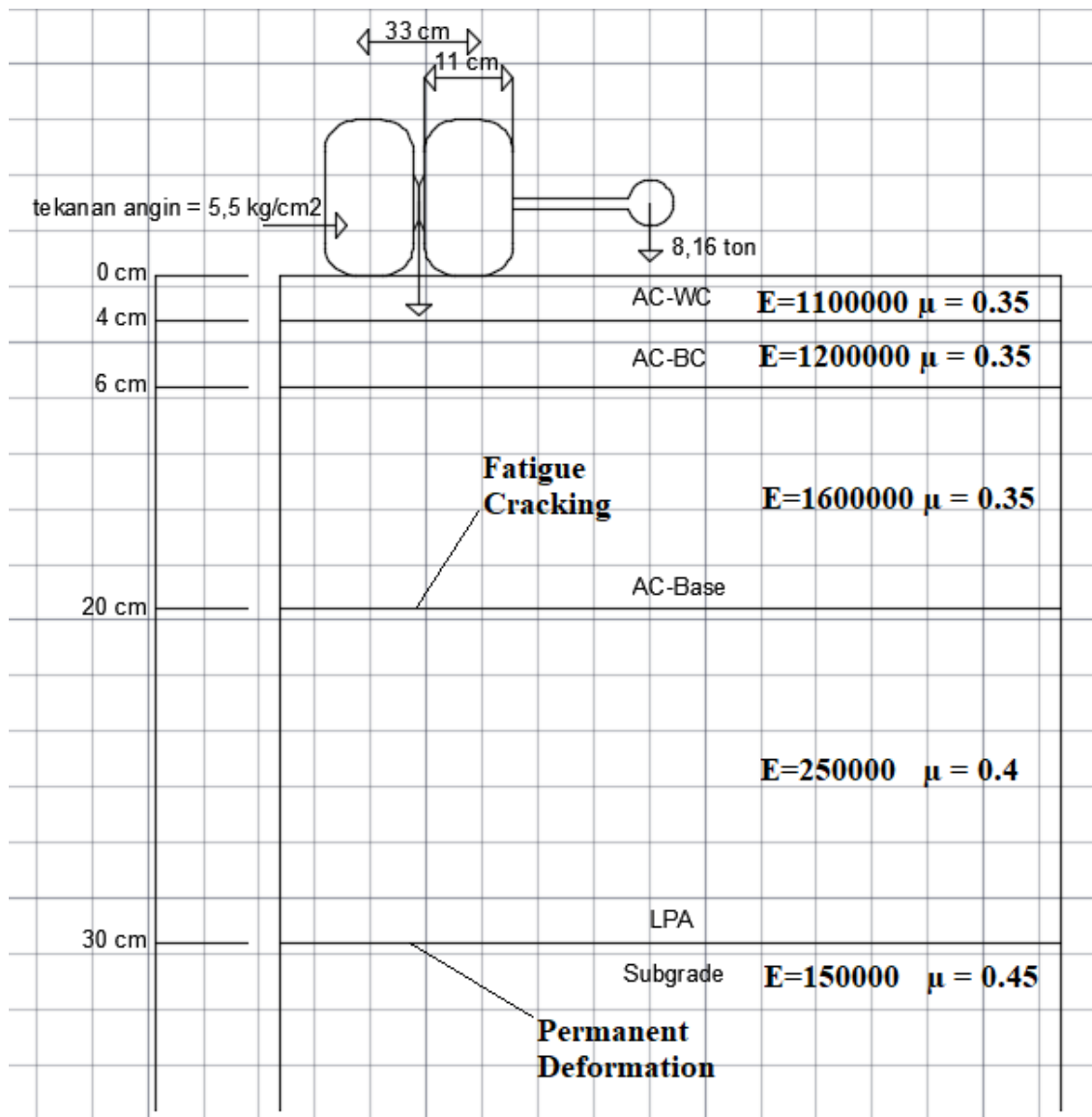
$\varepsilon_t$  =Regangan tarik vertikal diantara Lapisan Pondasi Atas dan *Subgrade*,

$f_5$  =Koefisien kriteria deformasi permanen, dan

$f_4$  =Koefisien kriteria deformasi permanen.

### Model Sistem Lapis Perkerasan

Model sistem lapis perkerasan elastik yang digunakan dalam studi ini diilustrasikan pada Gambar 4. Semua lapisan diasumsikan saling terikat. Untuk keperluan karakterisasi material perkerasan dan tanah dasar digunakan nilai-nilai tipikal yang disarankan dalam MDPJ Bina Marga 2017 dan Huang (2004), mengingat tidak dilakukannya pengujian langsung terhadap material di lapangan.



Gambar 4 Model Sistem Lapis Perkerasan

Dalam perkerasan dapat menggunakan beberapa karakteristik material, yaitu *Viscoelastic Layer* dan *Elastic Layer*. Penjelasan *Viscoelastic Layer* dan *Elastic Layer* dapat dilihat di bawah ini

**Karakteristik Material**

**1. Viskoelastik**

Untuk menganalisis layer aspal menerapkan sifat viskoelastis dimana waktu pembebanan mempengaruhi perilaku aspal. Solusi dari

pemodelan viskoelastik diperoleh melalui prinsip koresponden elastik-viskoelastik. Adapun pemodelan viskoelastik menggunakan penambahan beberapa variabel seperti *General*, *Time of Durations for Creep Compliances*, *Layer* dan *Creep Compliances*.

**2. Elastik**

Pemodelan secara elastik dapat menghitung tegangan, regangan dan defleksi di struktur

pekerasan yang permukaannya telah dibebani. Untuk pemodelan elastik menganggap bahwa setiap lapisan struktur perkerasan homogen, isotropis, dan elastis secara linear (Huang, 2004).

**Kontrol Beban Gandar dan Umur Pelayanan**

Data lalu lintas untuk perencanaan tebal perkerasan didasarkan pada Lalulintas Harian Rata-rata (LHR) ruas jalan Milir-Sentolo tahun 2017 (Tabel 2). Pembangunan dilakukan pada tahun 2018. Umur rencana ditetapkan 20 tahun dari tahun 2018. Diperkirakan rata-rata tingkat pertumbuhan lalu lintas pertahun mencapai 4,5%.

MDP Bina Marga 2017 menyediakan nilai *Vehicle Damage Factor* berupa  $VDF_4$  dan  $VDF_5$  untuk setiap jenis kendaraan pada Tabel 3. Repetisi beban sumbu standar rencana sepanjang umur rencana 20 tahun (*cumulative equivalent standard axle-load, CESA*) dihitung dengan Persamaan (3) berdasarkan  $VDF_4$  dan Persamaan (4) berdasarkan  $VDF_5$  (Bina Marga, 2017).

$$CESA_4 = (\sum_{gol.kendaraan} LHRT \times VDF_4) \times 365 \times DD \times DL \times R \tag{3}$$

$$CESA_5 = (\sum_{gol.kendaraan} LHRT \times VDF_5) \times 365 \times DD \times DL \times R \tag{4}$$

Pada Persamaan (3) dan (4),  $LHRT$  adalah Lalulintas Harian Rata-rata Tahunan, yang dalam hal ini didekati dengan nilai  $LHR$ .  $DD$  dan  $DL$  berturut-turut adalah distribusi arah dan distribusi lajur untuk kendaraan niaga. Sesuai desain ruas jalan Pakem-Prambanan sebagai jalan 2 lajur 2 arah,  $DD$  dan  $DL$  bernilai 0,5 dan 1. Sedangkan  $R$  merupakan faktor pertumbuhan lalu lintas yang dihitung dengan Persamaan (5).

$$R = \frac{(1+0,01i)^{UR}-1}{0,01i} \tag{5}$$

Pada Persamaan (5),  $i$  merupakan tingkat pertumbuhan lalu lintas pertahun (dalam %), dan  $UR$  adalah umur rencana struktur perkerasan.

**Tabel 2 Lalu Lintas Harian Rerata**

Gol	Jenis Kendaraan	LHR 2017	LHR 2018
1	Motor	27.677	29.005
2	Sedan, Jeep	8086	8474
3	Pick-up	294	308
4	Truk 2 As (L), Truk Kecil	1447	1516
5a	Bus Kecil	446	467
5b	Bus Besar	630	660
6a	Truk 2 As (H)	371	389
6b	Truk 2 As (H)	1140	1195
7a	Truk 3 As	420	440
7b	Trailer 4 As, Truk Gandeng	128	134
Gol	Jenis Kendaraan	LHR 2017	LHR 2018
7c	Truk Semi Trailer	166	174
	Kendaraan Tidak Bermotor	181	190

**Lokasi Penelitian**

Lokasi yang ditinjau sebagai objek studi kasus dalam penelitian ini adalah Ruas Jalan Milir-Sentolo, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Pada penelitian ini menggunakan ruas jalan Milir-Sentolo stasiun 21+525 sampai stasiun 22+52



Gambar 5 Lokasi Penelitian  
(Sumber : *Google Earth*, 2018)

Lalu untuk tebal perkerasan ruas Jalan Milir-Sentolo ini adalah sebagai berikut.

<i>AC-WC</i>	= 4 cm
<i>AC-BC</i>	= 6 cm
<i>AC-Base</i>	= 20 cm
Lapis Pondasi Agregat (LPA)	= 30 cm

### Tahapan Penelitian

Berikut langkah-langkah dalam penelitian ini.

1. Pertama mengumpulkan data sekunder yang didapatkan dari P2JN Yogyakarta seperti *CBR*, *properties material*, beban as atau sumbu kendaraan dan distribusi kendaraan, tebal perkerasan eksisting,

LHR serta penggolongan atau kelas kendaraan.

2. Lakukan analisis data dari perkerasan eksisting menggunakan Program *KENPAVE* untuk pemodelan elastik dan viskoelastik.
3. Lakukan analisis perbandingan prediksi umur perkerasan dengan mekanistik empiris perkerasan eksisting yang di analisis menggunakan Program *KENPAVE* pemodelan elastik dan viskoelastik.
4. Buat kesimpulan dari hasil analisis dan berikan saran.

**Prosedur Metode Kenpave**

Berikut langkah-langkah untuk prosedur metode *KENPAVE* untuk pemodelan elastik dan viskoelastik.

1. Analisa untuk parameter tiap lapisan seperti Modulus Elastisitas, *Poisson Ratio* dan tebal perkerasan.
2. Analisa juga untuk kondisi beban seperti menghitung *ESAL* dan menentukan detail beban sumbu dan roda.
3. Setelah itu lakukan analisa menggunakan Program *KENPAVE* untuk pemodelan elastik dan viskoelastik dengan memasukkan data hasil analisis ke Program *KENPAVE*.
4. Setelah didapatkan output dari Program *KENPAVE* berupa tegangan dan regangan, mulai lakukan perhitungan untuk repetisi beban menggunakan Fungsi Transfer Retak Lelah dan Deformasi Permanen.
5. Setelah didapatkan nilai repetisi beban dari semua fungsi transfer untuk pemodelan elastik dan viskoelastik, lakukan analisa umur berdasarkan prediksi kerusakan.
6. Lakukan pembahasan dan kesimpulan untuk perbedaan umur rencana dan prediksi umur perkerasan untuk pemodelan elastik dan viskoelastik.

**HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

**Desain Perkerasan Lentur Eksisting Menggunakan Program Kenpave Pemodelan Elastik**

Pada perkerasan lentur eksisting dilakukan pemodelan menggunakan program *Kenpave* pemodelan linier elastik. Setelah dilakukan pemodelan maka akan dihasilkan tegangan dan regangan maksimum pada setiap kemungkinan kerusakan yang akan terjadi.

Tabel 3 Regangan Maksimum

Beban	Regangan Horizontal 29,995	Regangan Vertikal 60,005
		1.070 x 10 <sup>-4</sup>
	1.136 x 10 <sup>-4</sup>	1.533 x 10 <sup>-4</sup>
	1.144 x 10 <sup>-4</sup>	1.551 x 10 <sup>-4</sup>
Max	1.144 x 10 <sup>-4</sup>	1.551 x 10 <sup>-4</sup>

Dari nilai regangan yang didapatkan, dapat dilakukan kontrol beban gandar maksimum yang dapat ditahan oleh perkerasan dan umur pelayanan dari jalan tersebut pada tiap kerusakan.

Tabel 4 Kontrol Beban Gandar Maksimum dan umur Pelayanan

Jenis Kerusakan	Beban Ganda Maksimum (ESAL)	Umur Pelayanan (Tahun)
<i>Fatigue Cracking</i>	1.141.579.4	55
<i>Permanent Deformation</i>	98	21
	154.797.390	

**Desain Perkerasan Lentur Eksisting Menggunakan Program Kenpave Pemodelan Viskoelastik**

Pada perkerasan lentur eksisting dilakukan pemodelan menggunakan program *Kenpave* pemodelan viskoelastik. Setelah dilakukan pemodelan maka akan dihasilkan tegangan dan regangan maksimum pada setiap kemungkinan kerusakan yang akan terjadi.

Tabel 5 Regangan Maksimum

Beban	Regangan Horizontal 29,995 cm	Regangan Vertikal 60,005
		1,328 x 10 <sup>-4</sup>
	1.414 x 10 <sup>-4</sup>	1.748 x 10 <sup>-4</sup>
	1.424 x 10 <sup>-4</sup>	1.771x 10 <sup>-4</sup>
Max	1.424 x 10 <sup>-4</sup>	1.771x 10 <sup>-4</sup>

Dari nilai regangan yang didapatkan, dapat dilakukan kontrol beban gandar maksimum yang dapat ditahan oleh perkerasan dan umur pelayanan dari jalan tersebut pada tiap kerusakan.

Tabel 6 Kontrol Beban Gandar Maksimum dan umur Pelayanan

Jenis Kerusakan	Beban Ganda Maksimum (ESAL)	Umur Pelayanan (Tahun)
<i>Fatigue Cracking</i>	483.817.902,7	39
<i>Permanent Deformation</i>	85.478.748	14

## PEMBAHASAN

Setelah dilakukannya analisis desain perkerasan lentur Jalan Milir-Sentolo untuk rekonstruksi pada perkerasan eksisting dengan menggunakan program *Kenpave-Kenlayer*, didapatkan beberapa hasil sebagai berikut

1. Pada pemodelan elastik, perkerasan lentur eksisting didapatkan respon tegangan dan regangan pada kerusakan *permanent deformation* di kedalaman 60,005 cm sebesar 0,000155 kPa dan kerusakan *fatigue cracking* di kedalaman 29,995 sebesar 0,000114 kPa. Kerusakan *fatigue cracking* akan terjadi di tahun ke-55 dengan beban repetisi sebesar 1.141.579.498 ESAL dan kerusakan *permanent deformation* akan terjadi di tahun ke-21 dengan beban repetisi sebesar 154.797.390 ESAL.
2. Pada pemodelan viskoelastik untuk perkerasan lentur eksisting dalam menggunakan Program *Kenpave* didapatkan respon tegangan dan regangan pada kerusakan *permanent deformation* di kedalaman 60,005 cm

sebesar 0,000177 kPa, dan kerusakan *fatigue cracking* di kedalaman 29,995 sebesar 0,000142 kPa. Kerusakan *fatigue cracking* akan terjadi di tahun ke-39 dengan beban repetisi sebesar 483.817.902,7 ESAL dan kerusakan *permanent deformation* akan terjadi di tahun ke-14 dengan beban repetisi sebesar 85.478.748 ESAL.

## KESIMPULAN

Sebuah analisis dengan pendekatan mekanistik empiris menggunakan Program *Kenpave* pemodelan elastik dan viskoelastik telah dilakukan terhadap desain perkerasan eksisting pada ruas jalan Milir-Sentolo yang didasarkan pada MDP 2017. Hasil analisis menunjukkan adanya resiko kerusakan *permanent deformation* yang dapat terjadi lebih kurang 6 tahun sebelum umur rencana 20 tercapai. Terdapat beberapa data dalam mendesain yang menggunakan asumsi-asumsi sehingga tingkat akurasi tidak terlalu akurat, maka dari itu perlunya menggunakan data primer atau uji laboratorium agar lebih akurat dalam menganalisis menggunakan program *Kenpave* pemodelan elastik dan viskoelastik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional (P2JN) Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang telah menyediakan data-data seperti hasil perhitungan perkerasan eksisting menggunakan MDP 2017, data *CBR* serta data lalu lintas harian rata-rata (LHR) untuk studi ini.

## DAFTAR PUSTAKA

Burmister, Donald M, 1943 "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways,"

- Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 23, pp . 126-144.
- Burmister, Donald M, 1945 "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems," *Journal of Applied Physics*, Vol. 16, pp . 84-94,126-127, 296-302 .
- Department Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, Juni, 2017, *Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017*, Jakarta.
- Hakim, Indri Nur, 2020, Kaji Ulang Desain Tebal Perkerasan Lentur pada Ruas Jalan Pakem-Prambanan Untuk Mengantisipasi Peningkatan Kelas Jalan pada Ruas Jalan Pakem-Tempel-Prambanan, Tugas Akhir, (Tidak Diterbitkan), Universitas Islam Indonesia.
- Huang, Yang H, 1967, *Evaluation of Integral by The Discrete Ordinary Method*. Pearson Education. United States of America.
- Huang, Yang H, 2004, *Pavement Analysis and Design*, 2<sup>nd</sup> ed. Pearson Education. United States of America.
- Rahmawati Anita, 2017, Evaluasi Tebal dan Analisi Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Analisa Komponen, *Austrroads, Asphalt Institute* dan Program *Kenpave*, Tugas Akhir, (Tidak Diterbitkan), Universitas Gadjah Mada.
- Sukirman Silvia, 1992, *Perkerasaan Lentur Jalan Raya*, Nova, Bandung.
- Suwanda, Muhammad Althaf, 2020, Analisis Perbandingan Desain Struktur Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Mekanistik Empiris Dengan Pemodelan Viskoelastik Dan Elastik Pada Ruas Jalan Tempel-Pakem Yogyakarta, Tugas Akhir, (Tidak Diterbitkan), Universitas Islam Indonesia.