

Research Article

Kinerja Struktur Perkerasan Aspal Porus Modifikasi dengan Pemodelan Program KENPAVE

Arief Aszharri¹, Dimas Ariezky Susetyo^{1,*}, dan Suherman Sulaiman²

¹Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

²Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

Received: 20 May 2024, Accepted: 22 November 2024, Published: 25 November 2024

Abstract

Flexible pavement planning methods can be classified into five categories, namely empirical methods, methods for limiting shear failure, methods for limiting deflection, regression methods based on pavement performance or road tests and empirical mechanistic methods. Pavement design procedures can be modeled as several layers or viscoelastic structures in an elastic band. By estimating that the pavement structure is like this, it is possible to calculate the stresses, strains, or deflections caused by traffic loads and environmental factors. This research will evaluate the construction structure of a porous asphalt mixture using cariphalte modified asphalt and the addition of gilsonite on a road section with a high traffic volume with an LHR above 50,000 pavement vehicles so that the thickness of the pavement structure layer will be obtained and then evaluated using the KENPAVE program. The results of this study show that the structural performance of porous asphalt mixtures with the addition of gilsonite in the pavement structure increases not significantly with increasing permit repetition loads at fatigue crack damage criteria of 0.5% and 0.45% for segment 4 and segment 5 respectively. Segment 3 showed a significant increase in the permit repetition load of 26.3% compared to the normal mixture. The structural performance of porous asphalt mixtures with the addition of gilsonite in the pavement structure increases insignificantly with the increase in the repetition permit load on the criteria for used grooves from vehicle wheels by 0.42% and 0.74% respectively for segment 4 and segment 5. However, in segment 3, there was a significant increase in the permit repetition load of 30.5% compared to the normal mixture.

© 2024 published by Sriwijaya University

Keywords: *fatigue, KENPAVE, modulus of elasticity, porous asphalt, rutting.*

1. PENDAHULUAN

Struktur perkerasan aspal porus merupakan teknologi baru yang masih berkembang. Struktur perkerasan ini umumnya digunakan untuk ruas jalan dengan volume lalu lintas rendah, fasilitas parkir kendaraan, jalur sepeda, fasilitas pejalan kaki/ trotoar dan lapangan tenis, serta sebagai alternatif teknik pengelolaan air atau konservasi lingkungan terhadap ketersediaan air [1]. Campuran aspal porus yang selanjutnya dikenal sebagai bagian dari struktur perkerasan berpori dapat menjadi lapisan permukaan dari suatu struktur perkerasan lentur yang ramah lingkungan dan sangat baik digunakan untuk parkir kendaraan [2].

Campuran aspal porus di rancang memiliki ruang pori yang tinggi dibandingkan dengan jenis struktur perkerasan campuran aspal konvensional. Porositas yang tinggi di dapat karena campuran aspal

porus di dominasi oleh agregat kasar dan kadar pasir yang rendah dalam campurannya. Namun porositas aspal porus yang tinggi berpengaruh langsung pada umur pelayanan campuran aspal, dimana umur pelayanan campuran aspal porus lebih pendek daripada struktur perkerasan konvensional. Hal ini disebabkan karena struktur perkerasan yang lebih berpori (porositas yang tinggi) sehingga stabilitasnya kecil [3].

Zhang dkk. [4] menyatakan bahwa Kinerja Marshall menunjukkan tingkat stabilitas aspal porus relatif rendah, maka campuran aspal porus belum dapat digunakan sebagai bagian lapis struktur perkerasan lentur pada jalan nasional maupun jalan provinsi dan atau jalan dengan lalu lintas berat. Penerapannya masih terbatas untuk lapangan parkir atau ruas jalan dengan volume lalu lintas yang rendah [5]. Akibat stabilitas yang rendah, aspal porus memerlukan aspal mutu tinggi sebagai bahan

pengikat agregat. Untuk meningkatkan nilai karakteristiknya, digunakan aspal modifikasi yang memiliki sifat-sifat fisis yang lebih baik dibandingkan dengan aspal konvensional pada umumnya. Salah satu alternatif aspal modifikasi adalah Aspal *Cariphalte*.

Chen & Wong [6] melakukan penelitian mengenai pengaruh Pemadatan Marshall pada stabilitas dan sifat volumetrik dari campuran dengan menggunakan Aspal *Cariphalte*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Aspal Modifikasi *Cariphalte* memberikan nilai stabilitas yang relatif lebih tinggi dibandingkan aspal konvensional dengan selisih 225,26 Kg.

Cavalli M dkk. [7] melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan *additive* terhadap Karakteristik Marshall pada campuran aspal porus. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa campuran aspal porus dengan bahan tambah *Gilsonite* terbukti dapat meningkatkan Nilai Stabilitas Marshall dibanding dengan bahan tambah lateks, serta dapat digunakan untuk jalan dengan lalu lintas sedang.

Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana karakteristik, kinerja struktural dan kinerja fungsional campuran aspal porus dengan menggunakan Aspal Modifikasi *Cariphalte* dan penambahan *Gilsonite* pada suatu ruas jalan dengan volume lalu lintas tinggi dengan LHR diatas 50.000 kendaraan.

Metode perencanaan perkerasan lentur dapat diklasifikasikan ke dalam lima kategori yaitu Metode Empiris, Metode dengan Batasan Kegagalan Geser, Metode dengan Batasan Defleksi, Metode Regresi berdasarkan Kinerja Perkerasan atau *Road Test* dan Metode Mekanistik Empiris [8]. Prosedur perencanaan perkerasan dapat dimodelkan dengan beberapa lapisan atau struktur viscoelastic dalam sebuah elastisitas. Dengan perkiraan struktur perkerasan tersebut, memungkinkan untuk menghitung tegangan, regangan atau defleksi yang disebabkan oleh beban lalu lintas dan faktor lingkungan [9].

Salah satu program bantu komputer yang dapat dipergunakan adalah Program KENPAVE yang dikembangkan oleh Dr. Yang H. Puang P.E Professor *Emeritus of Civil Engineering University of Kentucky*. Program ini ditulis dalam bahasa pemrograman Visual Basic dan dapat dijalankan dengan versi Windows 95 atau diatasnya. Program KENPAVE ini merupakan program analitis untuk perkerasa berdasarkan pada teori sistem lapis banyak.

Penelitian ini akan melakukan evaluasi terhadap struktur konstruksi perkerasan sehingga di dapat tebal lapis struktur perkerasan yang dievaluasi

menggunakan Program KENPAVE. Adapun tujuan penelitian lebih detil adalah sebagai berikut:

- 1) Menghasilkan modulus kekakuan campuran aspal porus yang meningkat akibat penggunaan Aspal Modifikasi *Cariphalte* dengan/tanpa menggunakan *additive Gilsonite* dari pengujian laboratorium menggunakan UMATTA.
- 2) Menghasilkan rancangan penanganan struktur perkerasan lentur pada Ruas Jalan Raya Dawuan (Cikampek) dalam bentuk penanganan *overlay structural* menggunakan aspal porus berdasarkan *Structural Condition Index (SCI)*.
- 3) Menghasilkan kinerja struktur perkerasan lentur dengan Metode AASHTO 1993 [10] dan menggunakan *Software* KENPAVE dengan Sub Program KENLAYER untuk mendapatkan nilai repetisi beban masing-masing dari nilai regangan tarik horizontal (ϵ_t) dan regangan tekan vertikal (ϵ_z).

2. METODE

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan pemodelan program perangkat lunak menggunakan data hasil perhitungan empiris, data sekunder lapangan, dan data hasil penelitian eksperimental skala laboratorium. Perhitungan empiris desain perkerasan jalan menggunakan Metode AASHTO 1993 [10]. Data sekunder lapangan yang digunakan antara lain data LHR Ruas Jalan Raya Dawuan (Cikampek), CBR tanah dasar, dan kondisi perkerasan (struktur perkerasan eksisting dan data lendutan). Sedangkan untuk data eksperimental yang digunakan adalah data hasil pengujian Modulus Resilient campuran aspal porus menggunakan Aspal *Cariphalte* dan bahan tambah *Gilsonite* dengan kadar optimum. Nilai Modulus Resilient diperoleh dari pengujian di laboratorium menggunakan alat *Universal Material Testing Apparatus (UMATTA)*. Tes Modulus Resilient dilakukan pada rentang suhu dan frekuensi pembebanan untuk mensimulasikan kondisi lingkungan dan beban lalu lintas di lapangan.

Evaluasi Kinerja Struktural Perkerasan

Menurut Su N dkk. [11], salah satu metode perencanaan tebal perkerasan adalah Metode AASHTO 1993 [10]. Metode ini sudah dipakai secara umum di seluruh dunia serta diadopsi sebagai standar perencanaan di berbagai negara.

Metode AASHTO 1993 [10] pada dasarnya didasarkan pada Metode Empiris. Adapun parameter yang dibutuhkan antara lain:

- a. Lalu lintas
- b. *Reliability*

- c. Faktor lingkungan
- d. *Serviceability*
- e. *Structural Number* (SN)

Analisis Struktural Perkerasan dengan Data Lendutan

Dalam penelitian ini, data lendutan (*deflection*) yang digunakan adalah data *true deflection* yang didapat dari pengujian perkerasan menggunakan alat *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

Nilai Lendutan Terkoreksi

Lendutan adalah besarnya gerak turun vertikal suatu permukaan perkerasan akibat beban [12]. Metode pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengukuran *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Data lendutan yang didapat dari lapangan tidak bisa langsung digunakan karena belum dikoreksi berdasarkan temperatur dan koreksi beban. Berikut Persamaan yang digunakan untuk menghitung lendutan terkoreksi:

$$dL = df \times Ft \times Ca \times FKB-FWD \quad (1)$$

dimana:

dL = lendutan langsung terkoreksi (mm)

df = lendutan langsung (mm)

Ft = faktor penyesuaian lendutan terhadap temperatur standar 35°C

Ca = faktor pengaruh muka air tanah (faktor musim)

$FKB-FWD$ = faktor koreksi beban uji *Falling Weight Deflectometer*

Perhitungan tebal lapis tambah dapat dilakukan pada setiap titik pengujian atau berdasarkan panjang segmen (seksi). Panjang segmen di dapat berdasarkan data lendutan dari lapangan yang bervariasi, kemudian dihitung berdasarkan persentase standar deviasi terhadap lendutan rata-rata pada beban pusat (df_1). Pada metoda Pd T-05-2005-B [12], tingkat keseragaman lendutan dalam satu ruas dinyatakan dalam faktor keseragaman (FK) dimana nilainya merupakan hasil bagi antara deviasi standar dan nilai rata-rata lendutan.

Perhitungan Nilai *Structural Number* Efektif

SN_{eff} adalah kapasitas struktur perkerasan pada saat pengujian jalan dengan menggunakan FWD pada tahun 2016. *Structural Number* efektif dapat dihitung pada setiap segmen yang didapatkan setelah melakukan segmentasi untuk menilai kinerja struktur perkerasan. Batasan perhitungan *Structural Number* efektif yang digunakan adalah *Metode Kavussi et All.*

Perhitungan Lalu lintas Rencana

Data yang digunakan untuk tahapan perhitungan *Load Equivalency Factor* (LEF) pada penelitian ini adalah data lalu lintas pada Ruas Jalan Raya Dawuan

Provinsi Jawa Barat. Volume lalu lintas dan perhitungan tingkat pertumbuhan lalu lintas pada Tahun 2016 – 2021.

Perhitungan Modulus Resilient Tanah Dasar

Modulus Resilien tanah dasar (MR) segmen dihitung menggunakan lendutan wakil pada jarak tertentu sesuai dengan *Geophone* yang digunakan pada alat FWD. Mengacu pada AASHTO 1993 [10] nilai Modulus Resilien tanah dasar untuk perencanaan diperoleh dengan mengoreksi Modulus Resilien tanah dasar hasil perhitungan lendutan balik dengan faktor koreksi 0,33 (untuk beban FWD, ± 9000 lbs), agar menyerupai nilai MR pada model perkerasan dari AASHTO 1993 *Road Test Soil* [10].

Perhitungan ESAL & CESA

Setelah mendapatkan nilai MR, nilai LEF dan nilai volume kendaraan, maka dilanjutkan ke perhitungan ESAL dan CESA untuk mendapatkan nilai SN_{future} yang ditinjau setiap tahunnya selama lima tahun rencana pemeliharaan. ESAL adalah beban lalu lintas rencana yang di dapat pada tahun itu juga sedangkan CESA adalah kumulatif beban yang akan ditinjau kedepannya.

CESA di dapat dari perkalian ESAL dengan *Growth Factor* (GF), Faktor Distribusi Lajur (DL), dan Distribusi Arah (DD). Nilai *Growth Factor* (GF) digunakan ketika tinjauan ESAL di cek untuk setiap tahun dengan nilai (n) mulai dari range 1 sampai dengan 5 (umur pemeliharaan ditinjau selama lima tahun). Nilai DD diambil 0,45 dan DL merupakan tinjauan dari jumlah lajur dan arah.

Perhitungan *Structural Number Future* (SN_{future})

Perhitungan SN_{future} dilakukan setelah mendapatkan nilai ESAL ataupun CESA dan data MR yang digunakan dengan pembagian segmentasi. SN_{future} ditentukan terlebih dahulu dengan menggunakan parameter tertentu. Parameter yang digunakan antara lain adalah *Reliability* (R), *Overall Standard Deviasi* (SO), *Initial Serviceability* (PO), dan *Terminal Serviceability* (Pt). Untuk jalan arteri digunakan nilai R adalah 95% dari range 85-99% sehingga nilai standar deviasi (ZR) didapat nilai -1,645. Nilai So untuk perkerasan lentur disarankan 0,45. Selanjutnya ditentukan nilai Po dan Pt dengan nilai masing-masing 4,2 dan 2,5.

Setelah didapat SN_{future} dilanjutkan dengan menghitung penanganan struktur perkerasan yaitu nilai SCI (*Structural Condition Index*).

Pemodelan Lapis Perkerasan Dengan Program Kenlayer

Sistem lapis banyak atau model lapisan elastis dapat menghitung tekanan dan regangan pada suatu titik dalam suatu struktur perkerasan. Model ini berasumsi bahwa setiap lapis perkerasan memiliki sifat-sifat homogen, isotropis dan linear elastik yang berarti akan kembali ke bentuk aslinya ketika beban dipindahkan. Permodelan lapis perkerasan jalan dengan model lapisan elastis ini memerlukan data input untuk mengetahui tegangan dan regangan pada struktur perkerasan dan respon terhadap beban. Parameter-parameter yang digunakan adalah:

1) Modulus Elastisitas

Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/SE.DB/2017 [13] memberikan Modulus Elastisitas tipikal berdasarkan iklim dan kondisi pembebanan di Indonesia sebagai pendekatan desain mekanistik terhadap desain yang telah dibuat.

2) *Poisson's Ratio*

Salah satu parameter penting yang digunakan dalam analisa elastis sistem pekerjaan jalan adalah *Poisson's Ratio*, yaitu angka perbandingan antara regangan horizontal (*lateral strain*) dan regangan vertikal (*axial strain*) yang disebabkan oleh beban sejajar sumbu dan regangan aksial [14].

3) Tebal Lapisan Perkerasan

Tebal setiap lapisan perkerasan diperlukan dalam teori sistem lapis banyak sebagai input dalam penyelesaian menggunakan program. Tebal setiap lapisan ditentukan berdasarkan Tebal Nominal Minimum Campuran Beraspal [13].

4) Kondisi Pembebanan

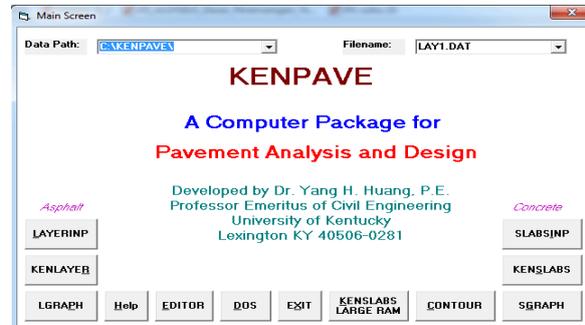
Pembebanan pada penelitian ini menggunakan data beban roda (kN/lbs), tekanan ban (kPa/Psi), jarak antara roda ganda kendaraan (cm/inc) dan anggapan perkerasan berbentuk lingkaran. Data pembebanan yang digunakan adalah data standar beban di Indonesia. Dengan menggunakan *software* akan mempermudah perhitungan tegangan, regangan dan lendutan di berbagai titik pada struktur perkerasan.

Program Kenpave

Sistem Program KENPAVE adalah software perencanaan perkerasan yang dikembangkan oleh Pahlavan F dkk. [15]. *Software* ini dibuat dalam bahasa pemrograman *Visual Basic* dan dapat dijalankan dengan operasi sistem Windows. Program ini di buat oleh Amerika sehingga memungkinkan untuk menggunakan Satuan English maupun Satuan Internasional. Selain itu, Indonesia mengadopsi AASHTO (*American Assosiation of State Highway and Transportation Officials*) [10] sebagai manual dalam merencanakan perkerasan lentur, sehingga

program ini layak untuk dijadikan sebagai evaluasi secara mekanistik terhadap desain yang ada.

Tampilan utama program KENPAVE terdiri dari dua menu pada bagian atas dan sebelas menu bagian bawah. Tiga menu pada bagian bawah kiri digunakan untuk perkerasan lentur dan lima menu pada bagian bawah kanan untuk perkerasan kaku, lainnya untuk tinjauan umum. Tampilan program ditunjukkan oleh Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tampilan utama program KENPAVE

Program Kenlayer

KENLAYER dapat diaplikasikan pada jenis perkerasan lentur. Dasar program ini adalah Teori Lapis Banyak. Teori Sistem Lapis Banyak adalah metode mekanistik yang digunakan dalam perencanaan perkerasan lentur dengan mengekivalenkan properties lapisan material seperti Modulus Elastisitas, *Poisson Ratio* dan tebal lapisan menjadi sistem perkerasan satu lapis. KENLAYER dapat diaplikasikan pada perilaku tiap lapis yang berbeda, baik linear, non linear atau viskoelastis. Selain itu, dapat diaplikasikan pada empat jenis sumbu roda, yaitu sumbu roda tunggal, roda ganda, sumbu tandem dan sumbu *triple*.

KENLAYER digunakan untuk menentukan rasio kerusakan menggunakan Model Tekanan (*Distress Models*) pada perkerasan lentur. *Distress Model* digunakan untuk memprediksi umur perkerasan baru dengan mengasumsi konfigurasi perkerasan. Regangan yang menghasilkan retak dan deformasi telah dianggap bagian penting untuk perkerasan aspal. Salah satunya adalah regangan tarik horizontal di bagian bawah lapisan aspal yang menyebabkan Retak Lelah (*Fatigue Cracking*) dan regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar yang menyebabkan Alur (*Rutting*).

Data Masukan Pada Program Kenlayer

Data yang diperlukan sebagai masukan dalam Program KENLAYER adalah data struktur perkerasan yang berkaitan dengan Perencanaan Tebal Perkerasan Metode Mekanistik Sistem Lapis Banyak. Data tersebut antara lain: Modulus Elastisitas, *Poisson Ratio*, tebal lapis perkerasan dan

kondisi beban. Modulus Elastisitas terdiri dari lapisan permukaan sampai tanah dasar yang telah ditentukan, sedangkan data kondisi beban berdasarkan data yang digunakan di Indonesia [16]:

- 1) Beban kendaraan sumbu standar = 8,16 Ton
- 2) Tekanan roda satu ban = 5,5 Kg/cm²
- 3) Jari-jari bidang kontak = 11 cm
- 4) Jarak antar masing-masing sumbu roda ganda sebesar 33 cm.

Konstruksi perkerasan jalan menerima beban lalu lintas yang dilimpahkan dari roda- roda kendaraan. Besarnya beban yang dilimpahkan tersebut diantaranya tergantung dari berat total kendaraan, konfigurasi sumbu, bidang kontak antara roda dan perkerasan serta kecepatan kendaraan. Dengan demikian efek tiap kendaraan terhadap kerusakan berbeda-beda sehingga perlu adanya beban standar agar semua beban lainnya dapat di konversi ke beban standar, yaitu beban sumbu tunggal beroda ganda seberat 8,16 ton.

Data yang telah dimasukkan ke dalam Program KELAYER dijadikan dasar analisis. Keluaran dari program tersebut adalah nilai dari tegangan, regangan dan lendutan. Selanjutnya data tersebut akan digunakan untuk perhitungan jumlah beban berdasarkan analisis kerusakan *Fatigue Cracking* dan *Rutting*.

Analisis Kerusakan Perkerasan Lentur

Analisis kerusakan perkerasan yang dibahas adalah Retak Lelah (*Fatigue Cracking*) dan Alur (*Rutting*). Jenis kerusakan *Fatigue Cracking* ditentukan berdasarkan nilai regangan tarik horisontal di bagian bawah lapis permukaan aspal akibat beban pada permukaan perkerasan. Jenis kerusakan *Rutting* dilihat berdasarkan nilai regangan tekan vertikal dibagian atas lapis tanah dasar (*subgrade*). Berdasarkan nilai kedua jenis kerusakan struktur tersebut, dapat diketahui jumlah repetisi beban yang diijinkan *Fatigue* (N_f) dan *Rutting* (N_d) yang terjadi pada struktur perkerasan jalan.

Retak Lelah dapat terjadi karena beban berulang yang dapat menyebabkan material menjadi lelah. Beban berulang berasal dari lintasan beban kendaraan yang terjadi secara terus menerus dengan intensitas yang berbeda beda dan bergantung kepada jenis kendaraan dan terjadi secara random. Menurut Asphalt Institute (1997) [17], merekomendasikan Persamaan *Fatigue Cracking* perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah repetisi beban yang diijinkan berdasarkan regangan tarik horisontal di bawah lapis permukaan, yaitu:

$$N_f = 0.0796 (\epsilon_t)^{-3.291} (E)^{0.854} \quad (2)$$

dimana:

- N_f = repetisi beban yang diijinkan untuk mengontrol terjadinya *fatigue cracking*
- ϵ_t = regangan tarik horisontal pada bagian bawah lapis permukaan
- E = modulus elastisitas lapisan permukaan

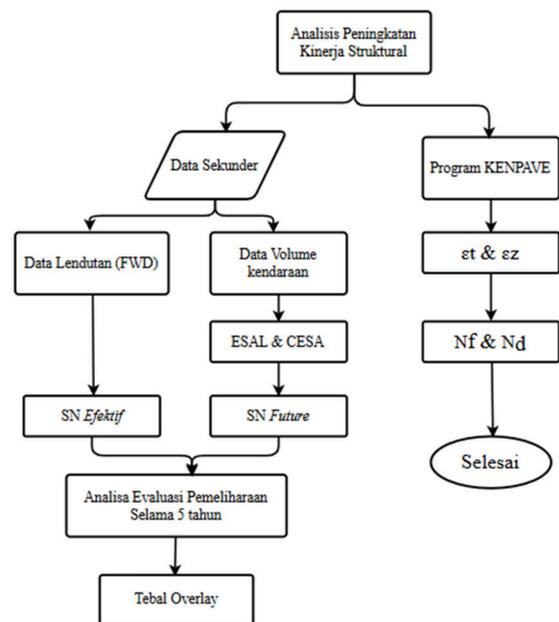
Alur (*Rutting*) yang terlihat pada permukaan perkerasan, merupakan akumulasi dari semua deformasi plastis yang terjadi, baik dari lapis beraspal, lapis agregat (pondasi) dan lapis tanah dasar. Kriteria *Rutting* merupakan kriteria kedua yang digunakan dalam metoda mekanistik untuk menyatakan keruntuhan struktur perkerasan akibat beban berulang. Umumnya dinyatakan dalam regangan tekan vertikal (ϵ_c) yang berada di atas lapisan tanah dasar (*subgrade*). Menurut Asphalt Institute (1997) [17] merekomendasi model persamaan *Rutting* untuk mengetahui jumlah repetisi beban yang diijinkan berdasarkan regangan tekan vertikal, yaitu:

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_c)^{-4.477} \quad (3)$$

dimana:

- N_d = jumlah repetisi beban yang diijinkan untuk mengontrol terjadinya *rutting*
- ϵ_c = regangan tekan vertikal diatas tanah dasar

Berikut adalah gambar diagram alur penelitian yang menjelaskan penelitian secara kesuruhan:



Gambar 2. Diagram alur penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perencanaan Overlay Struktural

Dengan menggunakan data sekunder yang ada seperti LHR dan data lendutan perkerasan jalan akan dilakukan perhitungan nilai lendutan, perhitungan

nilai Structural Number efektif, perhitungan lalu lintas rencana, perhitungan Modulus Resilient tanah dasar, perhitungan ESAL dan CESA menggunakan AASHTO 1993 [10] dan perhitungan *Struktur Number Future* (SN_{future}). Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai SCI (*Structural Condition Index*). Nilai SCI diambil dari hasil bagi antara $SN_{efektif}$ dengan SN_{future} . Hasil perhitungan menjelaskan bahwa nilai SCI lebih kecil dari 0,7 atau struktur perkerasan memerlukan *overlay*, sementara nilai SCI lebih besar daripada 0,7 tidak diperlukan *overlay*. Penanganan berupa pemeliharaan rutin dilakukan pada struktur perkerasan berupa kegiatan penutupan retak-ratak atau *crack sealing*, penambalan lubang atau *potholing* yang tidak memberikan perkuatan tambahan terhadap struktur perkerasan yang ada, namun dapat menghambat laju

tingkat kerusakan. Sedangkan penanganan *overlay* fungsional dapat berupa pelapisan ulang tipis yang tidak memberikan peningkatan terhadap kapasitas struktur perkerasan, meskipun ada sangat kecil dan dapat diabaikan.

Penanganan *overlay* struktural adalah kegiatan pemeliharaan berkala dengan pemberian pelapisan ulang yang dapat memberikan tambahan kapasitas struktur perkerasan dalam menerima beban repetisi untuk masa depan. Penentuan tebal *overlay* dihitung berdasarkan nilai kapasitas saat ini dan kapasitas masa depan sesuai dengan masa layanan yang direncanakan. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya hanya akan membahas terhadap segmen-segmen yang memerlukan *overlay* struktural. Hasil evaluasi penanganan berdasarkan kriteria SCI diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penanganan struktur perkerasan selama tahun 2019 – 2021

Segmen	Station	$SN_{efektif}$	Tahun 2019		Tahun 2020		Tahun 2021	
			SCI	Keterangan	SCI	Keterangan	SCI	Keterangan
1	0.000 - 0.800	483.985	109.287	Pemeliharaan Rutin	0.98453	Overlay Fungsional	0.92744	Overlay Fungsional
2	0.800 - 1.600	420.005	0.89493	Overlay Fungsional	0.80841	Overlay Fungsional	0.76263	Overlay Fungsional
3	1.600 - 2.400	367.818	0.74348	Overlay Fungsional	0.77337	Overlay Fungsional	0.636	Overlay Struktural
4	2.400 - 3.200	340.948	0.79976	Overlay Fungsional	0.71918	Overlay Fungsional	0.6768	Overlay Struktural
5	3.200 - 4.000	328.373	0.72397	Overlay Fungsional	0.75293	Overlay Fungsional	0.6154	Overlay Struktural

Tabel 2. Tebal lapis overlay campuran Aspal Porus Modifikasi, Normal dan Standart

Tahun	Segmen	$SN_{efektif}$	SN_{future}	$SN_{overlay}$	a	Modifikasi		Normal		Standar
						$D_{overlay}$ (cm)	a	$D_{overlay}$ (cm)	a	$D_{overlay}$ (cm)
2021	3	3.284	5.562	2.278		14		13		20
2021	4	3.409	5.038	1.628	0.404	10	0.403	10	0.27	16
2021	5	3.284	5.336	2.052		13		13		20

Rancangan penanganan *overlay* struktural pada suatu struktur perkerasan eksisting pada Ruas Jalan Raya Dawuan didasarkan kepada Tabel 1 sesuai parameter SCI. Dengan demikian, pelaksanaan lapis tambah atau *overlay* hanya terjadi pada tahun 2021 dilakukan pada segmen 3, segmen 4 dan segmen 5.

Setelah itu dilanjutkan dengan Nilai Modulus Elastisitas lapis *overlay* dari MDP 2017 [13] untuk mendapatkan nilai a sebagai perbandingan dari hasil pengujian yang telah dilakukan. Hasil perhitungan tebal *overlay* ditunjukkan oleh Tabel 2. Tabel 2 menjelaskan tebal masing-masing pemeliharaan berkala atau *overlay* dengan membandingkan

material yang digunakan yaitu aspal porus modifikasi, normal dan standar dimana campuran aspal porus modifikasi dan normal menunjukkan tebal yang sama.

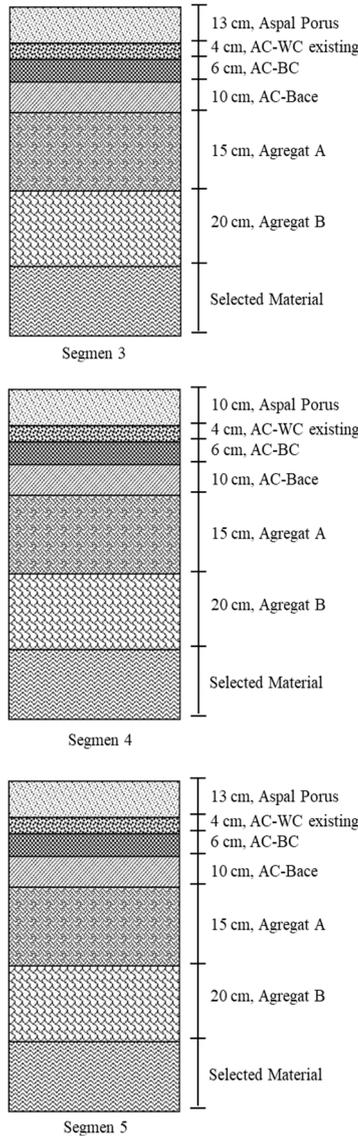
Setelah nilai a diperoleh menggunakan Modulus Elastisitas, kemudian ditentukan nilai-nilai lainnya. Nilai E sama dengan nilai Modulus Elastisitas dalam satuan MPa atau dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil Nilai Modulus Elastis modifikasi didapatkan dari hasil karakteristik campuran aspal porus optimum 7%. Campuran normal menggunakan 0% *Gilsonite* dan Modulus Elastis campuran AC-WC standar mengacu kepada MDP 2017 [13] yakni 1.100 MPa.



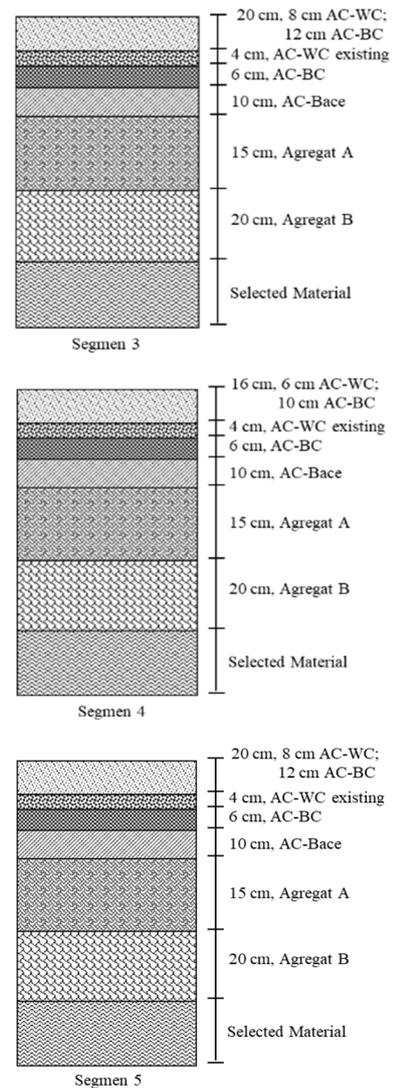
Tabel 3. Nilai koefisien tiap Model Perkerasan Aspal Porus

Jenis Campuran	MR (MPa)	a
Modifikasi	2.444	0,404
Normal	2.422	0,403
Standar	1.1	0,266

Setelah diperoleh nilai SN_{future} dan SN_{eff} pada Tabel 2, dilanjutkan dengan menghitung $SN_{Overlay}$. Tebal perkerasan menggunakan nilai a_1 yang ditunjukkan oleh Tabel 3 untuk masing-masing jenis campuran. Berikut adalah model desain *Overlay* pada tiap-tiap segmen.



Gambar 3. Desain *overlay* campuran Aspal Porus Modifikasi dengan *Gilsonite* dan Campuran Normal



Gambar 4. Desain *overlay* Campuran Campuran AC-WC Standar

Gambar 3 dan 4 menjelaskan bahwa desain perkerasan dengan menggunakan campuran *Gilsonite* menghasilkan tebal yang lebih tipis dibandingkan bahan AC-WC standar. Sebagai contoh untuk segmen 3 dengan campuran modifikasi menghasilkan tebal perkerasan sebesar 13 cm sedangkan AC-WC standar menghasilkan tebal 20 cm. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan modifikasi campuran *Gilsonite* menghasilkan lapis tambah (*overlay*) lebih tipis 7 cm dibandingkan menggunakan campuran AC-WC standar. Gambar 4 merupakan model struktur perkerasan menggunakan campuran AC-WC standar di mana tebal lapis perkerasan di bagi dua, yaitu tebal AC-WC dan tebal AC-BC. Hal ini dilakukan agar struktur perkerasan tetap kuat dan ekonomis. Pada struktur perkerasan AC - BC tebal yang direncanakan adalah 12 cm dan sisanya merupakan permukaan AC-WC. Pada segmen 3 dan 5 struktur perkerasan AC-WC memiliki tebal 8 cm sedangkan segmen 4 memiliki 9 cm.

Analisis Beban Repetisi Akibat Cracking dan Rutting

Nilai N_d yang diperoleh merupakan jumlah beban repetisi yang diakibatkan oleh respon regangan tekan vertikal (ϵ_z) dipermukaan tanah dasar, sedangkan N_f adalah jumlah repetisi beban yang diakibatkan oleh respon regangan tarik horizontal (ϵ_t) dibawah lapisan campuran beraspal. Pengaruh nilai N_d dan nilai N_f sangat dipengaruhi oleh nilai ketebalan setiap lapisan maupun nilai Modulus Resilen (MR). Selain itu, nilai Modulus Resilen setiap segmen dipengaruhi oleh nilai MR lapisan AC-WC masing-masing model dan nilai MR dari tanah dasar. Nilai MR aspal porus

modifikasi dan normal diambil dari hasil pengujian UMATTA, sementara MR AC- WC standar diambil dari Standar MDP 2017 [13] . Nilai modulus dari tanah dasar diperoleh dari perhitungan data lendutan masing-masing segmen.

Nilai N_d dan N_f dari masing- masing model struktur perkerasan dapat dilihat pada Tabel 2-5. Pada tabel berikutnya akan dijelaskan perbandingan antara kinerja aspal porus modifikasi (campuran aspal porus dengan penambahan *Gilsonite*), aspal porus normal (campuran aspal porus tanpa penambahan *Gilsonite*), dan AC-WC standar (campuran aspal concrete menggunakan Aspal Pen tanpan penambahan *Gilsonite*).

Tabel 4. Rekapitulasi repetisi beban (N) Struktur Perkerasan dengan aspal porus modifikasi

Tahun	Segmen	Tebal	ϵ_t	ϵ_z	N_f	N_d
2021	3	13	0,0001088	0,000225	3.082.684	29.153.049
2021	4	10	0,0001211	0,000212	2.166,942	38.367.380
2021	5	13	0,0001038	0,000181	3.598.895	78.308.211

Tabel 4 dan 5 memperlihatkan bahwa respon regangan tarik horizontal pada campuran aspal porus modifikasi mengalami penurunan sebesar 9,1%, 0,08% dan 0,09% berturut turut pada segmen 3, segmen 4 dan segmen 5 terhadap respon regangan tarik horizontal pada campuran aspal porus normal. Dengan demikian, beban repetisi (N_f) pada campuran aspal porus modifikasi mengalami peningkatan untuk segmen 3 dibandingkan terhadap campuran aspal porus normal. Sedangkan untuk segmen 4 dan segmen 5 penurunan respon regangan tarik horizontal yang sangat kecil, lebih kecil dari 1,0% atau tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan jumlah beban repetisi (N_f).

Di sisi lain, Tabel 4 dan 6 memperlihatkan bahwa kinerja campuran aspal porus modifikasi dalam struktur perkerasan menurun cukup signifikan dengan membesarnya respon regangan tarik horizontal sebesar 15,57%, 15,60% dan 15,71% berturut turut pada segmen 3, segmen 4 dan segmen 5 terhadap respon regangan tarik horizontal pada campuran AC-WC standar seperti diperlihatkan pada Tabel 4. Penurunan kinerja campuran aspal porus modifikasi dibandingkan dengan campuran AC-WC juga diperlihatkan dengan semakin kecilnya jumlah

repetisi beban N_f untuk ketiga segmen tersebut. Hal ini menunjukkan kriteria luasan retak sebesar 20% akan lebih cepat dicapai oleh campuran aspal porus modifikasi dibandingkan dengan campuran AC-WC. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa campuran beraspal dengan modulus elastisitas yang besar tidak selalu menghasilkan suatu struktur perkerasan yang dapat menerima jumlah repetisi beban yang lebih besar. Lapisan campuran beraspal AC-WC memberikan kinerja yang lebih baik dibanding dengan lapisan campuran aspal porus modifikasi, walaupun lapisan AC-WC mempunyai modulus elastisitas yang lebih kecil dari pada campuran aspal porus modifikasi. Hal ini terutama disebabkan oleh nilai modulus elastisitas yang lebih besar dari 1.500 MPa sehingga lapis campuran tersebut semakin kaku dan semakin mudah untuk retak. Kinerja campuran modifikasi dalam struktur perkerasan pada segmen 3 dan segmen 4 tidak meningkat secara signifikan ditinjau dari nilai beban repetisi izin terhadap kriteria alur bekas sejak roda kendaraan pada campuran normal. Peningkatan yang terjadi hanya sebesar 0,42%, 0,74%. Namun pada segmen 3 terjadi peningkatan yang signifikan sebesar 30,54%.

Tabel 5. Rekapitulasi repetisi beban (N) Struktur Perkerasan dengan Aspal Porus Normal

Tahun	Segmen	Tebal	ϵ_t	ϵ_z	N _f	N _d
2021	3	11	0.0001197	0.000244	2,268,927	20,248,800
2021	4	10	0.0001212	0.000212	2,177,816	38,205,598
2021	5	13	0.0001039	0.000181	3,615,319	77,728,482

Demikian juga kinerja campuran aspal porus modifikasi dalam struktur perkerasan meningkat cukup signifikan dengan membesarnya beban repetisi izin terhadap kriteria alur bekas sejak roda kendaraan sebesar 35,34%, 35,73% dan 35,41%

masing-masing di segmen 3, segmen 4 dan segmen 5 terhadap beban repetisi izin terhadap kriteria alur bekas roda kendaraan pada campuran AC-WC standar pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi repetisi beban (N) Struktur Perkerasan dengan AC-WC standar

Tahun	Segmen	Tebal	ϵ_t	ϵ_z	N _f	N _d
2021	3	17	0.00009185	0.000204	10,643,150	45,088,021
2021	4	16	0.0001022	0.000193	7,489,638	57,900,027
2021	5	20	0.00008749	0.000164	12,490,464	121,240,951

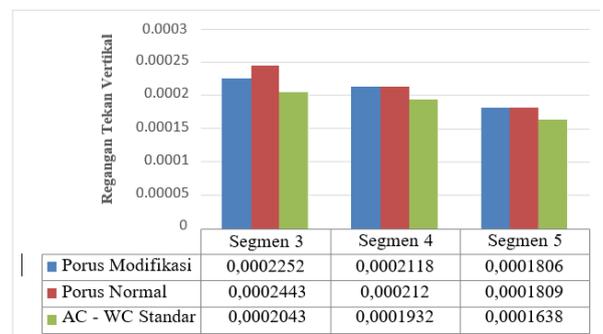
Hasil dari AC-WC standar memiliki perbedaan dikarenakan perbedaan tebal yang lebih besar daripada tebal model AC-WC modifikasi dan normal. Pengaruh Modulus Resilen merupakan salah satu penyebab tingginya struktur perkerasan dari masing-masing segmen. Hal ini sama dengan penjelasan model struktur perkerasan AC-WC standar pada Tabel 6, yaitu semakin tebal struktur perkerasan akan meningkatkan nilai respon regangan tekan vertikal (ϵ_z) sehingga jumlah repetisi beban (N_d) akan semakin tinggi. Untuk nilai respon regangan tarik horizontal (ϵ_t), jika dipengaruhi oleh tebal, maka akan semakin kecil. Hal ini terlihat pada tebal struktur perkerasan antara yang memiliki ketebalan 17,0 cm dengan 20,0 cm. Model perkerasan AC-WC standar memiliki 8 lapisan dikarenakan tebal perkerasan 16,0 cm, 17 cm dan 20,0 cm. Hal ini menyebabkan dilakukannya pembagian jenis AC-WC yaitu AC-WC dan AC-BC sehingga biaya yang dikeluarkan akan lebih ekonomis tanpa mengurangi tebal struktur perkerasan. Sedangkan model perkerasan aspal porus modifikasi dan normal memiliki 7 lapisan dan lapisan yang baru hanya dilakukan pada permukaan AC-WC saja. Nilai yang didapatkan dari hasil Program KENLAYER, kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian Modulus Elastisitas yang disajikan pada Tabel 7. Besarnya nilai repetisi beban izin berdasarkan kriteria deformasi permanen *Rutting* (N_d) dengan nilai MR campuran AC-WC yang semakin kecil akan menghasilkan nilai repetisi beban izin yang semakin rendah pula. Di sisi lain, nilai repetisi beban izin berdasarkan kriteria *Fatigue Cracking* atau N_f akan

menghasilkan nilai yang semakin besar jika nilai Modulus Elastisitasnya rendah.

Nilai modulus yang didapatkan dari hasil pengujian UMATTA jika terlalu tinggi, maka akan berdampak pada struktur perkerasan, yaitu menjadi semakin kaku sehingga jika dibebani oleh kendaraan yang melintas akan membuat struktur perkerasan menjadi getas. Mengacu kepada MDP 2017 [13] nilai Modulus Elastisitas pada perkerasan jalan adalah 1100 Mpa.

Tabel 7. Hubungan nilai Modulus Elastisitas terhadap N_f dan N_d

Parameter	Jenis Campuran		
	Porus Modifikasi	Porus Normal	AC-WC Standar
N _f (juta ESAL)	2.1 - 3.6	2.1 - 3.6	7.4 - 12.4
N _d (juta ESAL)	29.1 - 78.3	20.2 - 77.7	45.0 - 121.2
E (Mpa)	2444	2422	1100

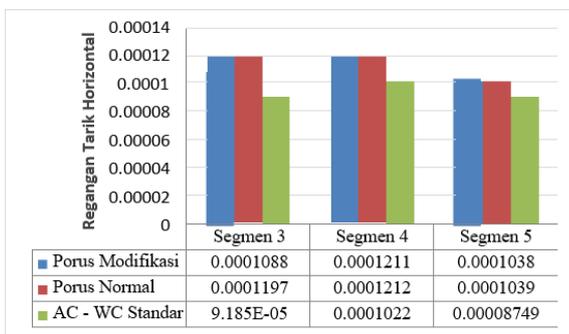


Gambar 5. Nilai regangan tekan vertikal (ϵ_z) pada setiap segmen

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai regangan tekan vertikal (ϵ_z) terkecil terjadi pada lapisan AC-

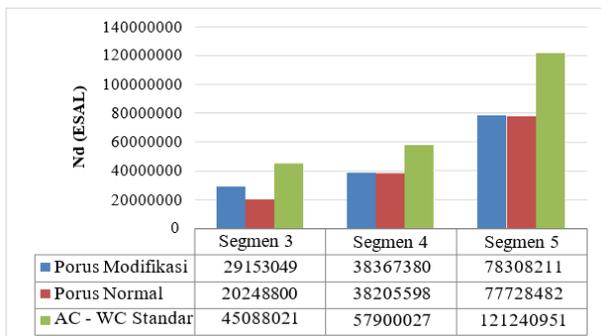
WC di ketiga segmen tersebut. Hal ini memberikan indikasi bahwa bahwa lapis AC-WC akan lebih baik dibandingkan dengan dengan 2 lapisan lainnya terhadap jenis kerusakan alur bekas roda kendaraan atau Rutting. Pengaruh nilai ϵ_z pada AC-WC standar dilihat dari tebal dan nilai MR yaitu 1.100 MPa yang berbeda pada campuran aspal porus modifikasi dan normal dimana memberikan informasi bahwa nilai regangan tekan vertikal membesar akibat peningkatan nilai Modulus Elastis yang terjadi.

Jika dihubungkan pada struktur perkerasan AC-WC dilapangan, maka waktu untuk pelaksanaan pemeliharannya akan lebih cepat, khususnya pada lapisan tanah dasar karena *Rutting*. Semakin besar nilai regangan tekan vertikal, maka struktur akan lebih cepat mengalami *Rutting*.



Gambar 6. Nilai regangan tarik horizontal (ϵ_t) pada setiap segmen

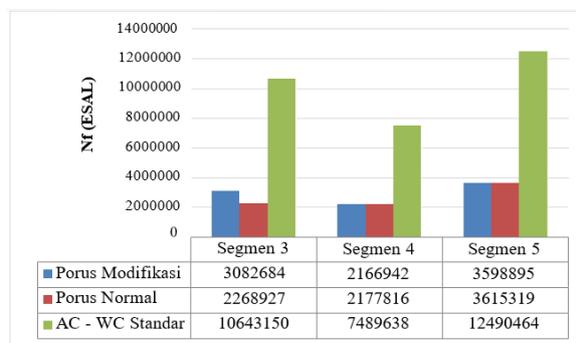
Nilai regangan tarik horizontal atau ϵ_t mengalami penurunan pada segmen 5 dikarenakan pengaruh nilai MR dan tebal struktur perkerasan yang berbeda. Hal ini menggambarkan bahwa semakin tinggi nilai MR, maka akan semakin besar nilai *cracking* yang dihasilkan. Hal ini membuktikan bahwa adanya nilai MR yang besar mengakibatkan struktur perkerasan menjadi sangat kaku atau getas sehingga akan mempercepat waktu *cracking*, terutama untuk lapisan campuran beraspal dengan nilai MR lebih besar dari pada 1500 MPa. Hal tersebut memberi indikasi bahwa luasan *cracking* terkecil dihasilkan pada lapisan campuran AC-WC standar.



Gambar 7. Nilai jumlah repetisi beban akibat Rutting (N_d) pada setiap segmen

Gambar 7 menunjukkan bahwa pengaruh nilai respon regangan tekan vertikal (ϵ_z) dari *output* KENLAYER yang rendah akan meningkatkan jumlah beban repetisi. Dengan demikian, nilai ϵ_z yang kecil akan menghasilkan jumlah beban repetisi yang besar (N_d). Besaran N_d ini didasarkan kepada kriteria kedalaman alur maksimum sedalam 2,5 inci.

Disamping itu besarnya nilai ϵ_z sangat dipengaruhi oleh tebal lapis perkerasan. Walaupun pada campuran AC-WC standar memiliki nilai modulus lebih kecil, namun tebal yang dihasilkan lebih besar sehingga membuat nilai N_d pada setiap segmen juga besar. Hal ini akan menyebabkan keadaan struktur tanah dasar akan lebih kuat menggunakan model struktur perkerasan AC-WC standar daripada menggunakan campuran aspal porus modifikasi dan normal.



Gambar 8. Nilai jumlah repetisi beban akibat cracking (N_f) pada setiap segmen

Gambar 8 mendeskripsikan pemodelan AC-WC yang di tinjau berdasarkan nilai *cracking* dari *output* KENLAYER. Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan nilai ϵ_t yang tinggi akan menghasilkan jumlah repetisi beban yang rendah. Semakin tinggi MR yang digunakan pada masing-masing pemodelan AC-WC, maka kemampuan struktur perkerasan semakin rendah menahan beban lalu lintas yang dapat menyebabkan kerusakan retak - retak. Hal ini menandakan hubungan nilai *cracking* dan nilai jumlah beban repetisi akibat *cracking* berbanding terbalik. Dengan demikian MR yang tinggi akan menghasilkan struktur perkerasan yang kaku dan getas sehingga jika dibebani kendaraan yang melampaui jumlah repetisi beban, maka kriteria luasan retak sebesar 20% akan lebih cepat tercapai.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis penelitian mengenai kinerja struktur perkerasan aspal porus modifikasi dengan pemodelan Program KENPAVE menunjukkan bahwa:

1. Perhitungan SCI yang dilakukan setiap tahun, mulai dari tahun 2019 sampai dengan 2021 menunjukkan kondisi perkerasan yang terus

mengalami penurunan sehingga penanganan ruas jalan yang ditinjau berbeda-beda. Penangan *overlay* secara struktural terjadi pada tahun 2021 terjadi pada segmen 3, 4 dan 5 berdasarkan nilai SCI 0,63, 0,61 dan 0,67 yang diambil dari perbandingan antara parameter $SN_{efektif}$ dan SN_{future} .

2. Kinerja struktural campuran aspal porous dengan penambahan Gilsonite sdalam struktur perkerasan meningkat tidak signifikan dengan membesarnya beban repetisi izin pada kriteria kerusakan retak lelah sebesar 0,5% dan 0,45% berturut-turut untuk segmen 4 dan segmen 5. Namun pada segmen 3 terjadi peningkatan beban repetisi izin yang signifikan sebesar 26,3 % terhadap campuran normal.
3. Kinerja struktural campuran aspal porous dengan penambahan Gilsonite dalam struktur perkerasan meningkat tidak signifikan dengan membesarnya beban repetisi izin pada kriteria alur bekas sejak roda kendaraan sebesar 0,42% dan 0,74% berturut-turut untuk segmen 4 dan segmen 5. Namun pada segmen 3 terjadi peningkatan beban repetisi izin yang signifikan sebesar 30,5% terhadap campuran normal.
4. Kinerja campuran standar (campuran Aspal Concrete dengan Aspal Pen) yang dihasilkan dalam struktur perkerasan lebih besar dibandingkan kinerja campuran modifikasi ditinjau dari beban repetisi izin pada kriteria alur bekas sejak roda kendaraan sebesar 35,34 %, 33,73 % dan 35,41% berturut-turut untuk segmen 3, segmen 4 dan segmen 5. Demikian juga kinerja yang dihasilkan campuran standar lebih besar dibandingkan campuran modifikasi ditinjau dari beban repetisi izin pada kriteria kerusakan retak lelah sebesar 71,03 %, 71,06 % dan 71,18 % berturut-turut untuk segmen 3, segmen 4 dan segmen 5. Hal ini dikarenakan tebal yang dihasilkan campuran standar jauh lebih besar dibandingkan campuran modifikasi. Pada segmen 3, segmen 4, dan segmen 5 tebal yang dihasilkan campuran standar sebesar 17 cm, 16 cm dan 20 cm, sedangkan campuran modifikasi sebesar 13 cm, 10 cm, dan 13 cm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Bandung, teknisi PUSJATAN (PUSAT JALAN JEMBATAN) dan pihak-pihak terkait yang telah membantu kelancaran proses penelitian campuran aspal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Arimilli, M. N. Nagabhushana, and P. K. Jain, "Comparative mechanistic-empirical analysis for design of alternative cold recycled asphalt technologies with conventional pavement," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 19, no. 7, pp. 1595–1616, Oct. 2018, doi: 10.1080/14680629.2017.1338187.
- [2] N. Bala and M. Napiah, "Fatigue life and rutting performance modelling of nanosilica/polymer composite modified asphalt mixtures using Weibull distribution," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 497–506, Mar. 2020, doi: 10.1080/10298436.2018.1492132.
- [3] A. M. Al-Sabaeei, M. B. Napiah, M. H. Sutanto, W. S. Alaloul, and A. Usman, "A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions," *J Clean Prod*, vol. 249, pp. 1–35, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119357.
- [4] R. Zhang, Z. You, H. Wang, X. Chen, C. Si, and C. Peng, "Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt," *Constr Build Mater*, vol. 189, pp. 568–575, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.201.
- [5] O. N. Çelik and S. O. Eyada, "Assessment of flexible pavement fatigue life of Turkish typical sections using mechanistic empirical pavement design approach for coastal region," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 33–43, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.asej.2018.02.008.
- [6] M. J. Chen and Y. D. Wong, "Porous asphalt mixture with 100% recycled concrete aggregate," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. 4, pp. 921–932, Sep. 2013, doi: 10.1080/14680629.2013.837839.
- [7] M. C. Cavalli, M. Zaumanis, E. Mazza, M. N. Partl, and L. D. Poulikakos, "Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators," *Compos B Eng*, vol. 141, pp. 174–181, May 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.060.
- [8] T. Saevarsdottir and S. Erlingsson, "Deformation Modelling of Instrumented Flexible Pavement Structure," *Procedia Eng*, vol. 143, pp. 937–944, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.076.
- [9] K. B. Batista et al., "High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders," *Ind Crops Prod*, vol. 111, pp. 107–116, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2017.10.010.
- [10] AASHTO 1993, "Guide for Design of Pavement Structures," 1993
- [11] N. Su, F. Xiao, J. Wang, L. Cong, and S. Amirhanian, "Productions and applications of bio-asphalts – A review," *Constr Build Mater*, vol. 183, pp. 578–591, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118.
- [12] Pd T-05-2005-B, *Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metoda Lendutan*. Indonesia: Departemen Pekerjaan Umum, 2005.
- [13] MDP, "Manual Desain Perkerasan Jalan," 02/M/BM/2017, Jun. 22, 2017
- [14] J. Camacho-Tauta, O. Reyes-Ortiz, A. V. Da Fonseca, S. Rios, N. Cruz, and C. Rodrigues, "Full-scale Evaluation in a Fatigue Track of a Base Course Treated with Geopolymers," *Procedia Eng*, vol. 143, pp. 18–25, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.071.
- [15] F. Pahlavan, M. Mousavi, A. M. Hung, and E. H. Fini, "Characterization of oxidized asphaltenes and the restorative effect of a bio-modifier," *Fuel*, vol. 212, pp. 593–604, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.090.

- [16] S. Kishchynskyi, V. Nagaychuk, and A. Bezuglyi, "Improving Quality and Durability of Bitumen and Asphalt Concrete by Modification Using Recycled Polyethylene Based Polymer Composition," *Procedia Eng*, vol. 143, pp. 119–127, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.016.
- [17] Asphalt Institute, *Mix Design Method For Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types MS-2*, Sixth Edition. Lexington, Kentucky: Asphalt Institute Engineering, 1997.