

KAJI ULANG DESAIN TEBAL PERKERASAN LENTUR PADA RUAS JALAN PAKEM-PRAMBANAN UNTUK MENGANTISIPASI PENINGKATAN STATUS JALAN

Indri Nurtiyani Hakim¹, Berlian Kushari^{*2}

^{1,2} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

*Email: bkushari@uii.ac.id

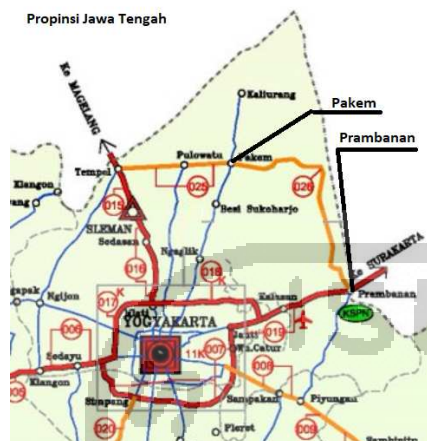
ABSTRAK

Dalam rangka rekonstruksi untuk peningkatan status dan fungsi ruas jalan Pakem-Prambanan, telah dilakukan desain lapis perkerasan lentur berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) No. 02/M/BM/2013 oleh satuan kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional (P2JN) Provinsi DIY yang menghasilkan rekomendasi struktur perkerasan dari atas ke bawah berturut-turut: AC-WC 4 cm, AC-BC 6 cm, AC-Base 8 cm, dan LP kelas A 30 cm. Desain tersebut telah digunakan dalam rekonstruksi ruas Pakem-Prambanan tahun 2018. Makalah ini melaporkan hasil kaji ulang terhadap rekomendasi desain tersebut guna memperkirakan apakah umur rencana 20 tahun dapat dicapai. Lebih lanjut, mengingat MDPJ 2013 telah direvisi dengan MDPJ 2017, dilakukan pula desain struktur perkerasan berdasarkan MDPJ 2017 untuk melihat bagaimana perbedaan rekomendasi struktur perkerasan dari kedua manual tersebut. Kaji ulang dilakukan dengan pendekatan mekanistik-empiris sistem multi-layer elastik dan 2 fungsi transfer untuk memprediksi jumlah repetisi beban gandar standar kumulatif (CESA) yang akan menimbulkan kerusakan retak leleh (N_f) dan deformasi permanen (N_d) pada struktur perkerasan. Modul Kenlayer pada perangkat lunak Kenpave digunakan dalam pemodelan mekanistik. Hasil kaji ulang menunjukkan bahwa desain berdasarkan MDPJ 2013 di atas diperkirakan akan mengalami deformasi permanen pada tahun ke-18 dan retak leleh tahun ke-59. Desain berdasarkan MDPJ 2017 merekomendasikan lapis AC-Base dipertebal menjadi 10,5 cm. Penebalan ini dapat menunda kerusakan deformasi hingga tahun ke-27. Optimasi desain dengan menebalkan lapis AC-Base menjadi 9 cm dan 10 cm cukup untuk menunda terjadinya kerusakan deformasi masing-masing hingga tahun ke-22 dan ke-25.

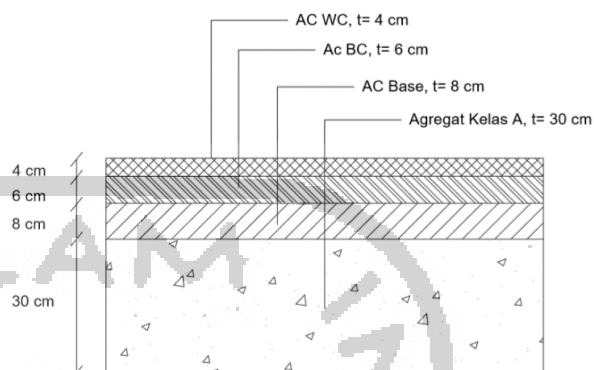
Kata kunci: perkerasan lentur, mekanistik-empiris, MDPJ Bina Marga 2013, MDPJ Bina Marga 2017, Kenpave, Kenlayer

PENDAHULUAN

Ruas jalan Pakem-Prambanan berdasarkan Keputusan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat RI Nomor 290/KPTS/M/2015 berubah statusnya dari Jalan Provinsi menjadi Jalan Nasional. Ruas jalan tersebut pada masa mendatang akan digunakan sebagai bagian dari Yogyakarta *Outer Ringroad* dengan fungsi Kolektor Primer (Gambar 1). Untuk mengantisipasi peningkatan beban lalu lintas yang lebih tinggi sebagai konsekuensi dari peningkatan status dan fungsi tersebut, dilakukan rekonstruksi struktur perkerasan jalan dengan desain sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. Desain yang dilakukan oleh satuan kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional (P2JN) Daerah Istimewa Yogyakarta ini didasarkan pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2013 (Manual No. 02/M/BM/2013), dengan hasil jenis dan tebal lapis perkerasan dari atas ke bawah berturut-turut: AC-WC 4 cm, AC-BC 6 cm, AC Base 8 cm, serta LP Agregat Kelas A 30 cm.



Gambar 1 Ruas Jalan Pakem-Prambanan



Gambar 2 Desain Struktur Perkerasan P2JN DIY

Pada saat pekerjaan fisik rekonstruksi dilakukan pada tahun 2018 yang lalu, Direktorat Jenderal Bina Marga telah mengeluarkan MDPJ terbaru tahun 2017 yang kini ditetapkan sebagai acuan bagi perencanaan maupun rehabilitasi perkerasan jalan. Dengan penetapan tersebut maka MDPJ 2013 dinyatakan tidak berlaku lagi.

Studi ini bertujuan untuk meninjau ulang hasil desain rekonstruksi ruas jalan Pakem-Prambanan guna menjawab beberapa pertanyaan berikut: (1) Apakah desain tersebut dapat mencapai umur rencana 20 tahun sebagaimana dipersyaratkan dalam manual desain, baik 2013 maupun 2017? (2) Apakah dengan data lalu lintas yang mutakhir dan data material yang sama diperoleh rekomendasi lapis struktural dan ketebalan yang sama jika digunakan MDPJ 2017? (3) Apakah hasil desain MDPJ 2017 optimal untuk umur rencana 20 tahun? (4) Apakah terdapat alternatif desain struktur perkerasan yang optimal untuk umur rencana 20 tahun?

Sebuah metodologi dikembangkan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan di atas berdasarkan tinjauan analisis mekanistik-empiris dengan pendekatan teori elastik berlapis (*layered-elastic theory*) pada bagian mekanistiknya, diikuti dengan 2 fungsi empiris (*transfer function*) untuk mentransfer nilai-nilai regangan yang dihasilkan dari analisis mekanistik menjadi jumlah kumulatif lintasan beban standar yang menyebabkan kerusakan retak leleh (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 makalah ini menjelaskan tentang metodologi kaji ulang, hasil analisis dan pembahasan, serta simpulan kaji ulang.

METODOLOGI

Teori Elastik Berlapis (*layered-elastic*)

Pendekatan mekanistik untuk memodelkan fisika-mekanika struktur perkerasan dapat dilakukan, salah satunya, menggunakan model elastik berlapis. Model ini sering menjadi pilihan karena melibatkan model matematik yang relatif simpel. Selain model ini, telah dikembangkan pula model-model lain, seperti model dinamik, viskoelastik, ataupun elemen hingga (lihat misalnya: Ghadimi dkk., 2007 dan Huebner dkk, 2001). Model material elastik berlapis berawal dari teori klasik V. J. Boussinesq pada tahun 1885. Dalam model ini diasumsikan bahwa setiap lapis perkerasan bersifat homogen, isotropik, dan elastik linear. Selain itu, diasumsikan pula bahwa perkerasan terbentang secara tak berhingga pada arah horisontal, tidak mengalami tenggangan di

luar batas-batas elastisitasnya, serta terletak di atas tanah dasar dengan tebal tak berhingga ke bawah.

Input bagi model ini untuk mengkarakterisasi material perkerasan dan respon strukturnya meliputi: modulus elastisitas (E) dan rasio *Poisson* (μ) setiap lapis, tebal tiap lapis (t), serta kondisi pembebanan, yaitu besarnya, geometrinya, serta repetisinya. Sedangkan outputnya berupa: tegangan (σ), regangan (ϵ), dan defleksi (δ). Perangkat lunak analisis elastik berlapis, misalnya: KENPAVE, WINLEA, EVERSTRS, EVERFLEX, dan VESYS 5W (lihat Al-Khateeb dkk, 2007), dapat 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 (ϵ_t)	Memprediksi kerusakan retak lelah pada lapis beraspal
Bagian atas pada lapis pondasi atas (<i>base</i>) atau lapis pondasi bawah (<i>subbase</i>)	Regangan desak arah vertikal (ϵ_c)	Memprediksi kerusakan alur pada lapis pondasi atas atau bawah
Bagian atas lapis tanah dasar (<i>subgrade</i>)	Regangan desak arah vertikal (ϵ_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 untuk kerusakan retak lelah (N_f) umumnya mengambil bentuk (Huang, 2004):

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

Dalam Persamaan (1), E_1 adalah modulus elastisitas lapis berbahan ikat aspal. Konstanta f_1 , f_2 , dan f_3 diperoleh dari pengujian lelah (*fatigue*) laboratorium. Asphalt Institute (dalam Shook dkk, 1982) menyarankan nilainya berturut-turut: 0,0796, 3,921, dan 0,854. Sementara itu, fungsi transfer untuk kerusakan deformasi permanen (N_d) diformulasikan sebagai berikut:

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

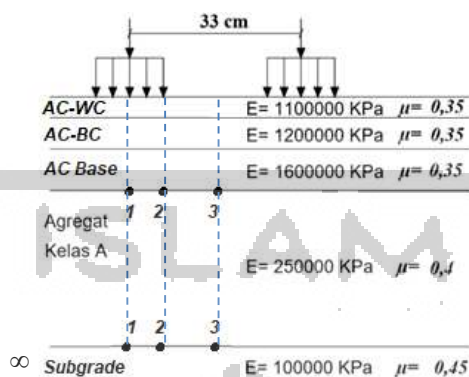
Dalam Persamaan (2), ϵ_c ditinjau pada bagian atas lapis tanah dasar (*subgrade*). Konstanta f_4 dan f_5 diperoleh dari hasil pengujian lapangan. Asphalt Institute (1982) menyarankan nilainya $1,365 \times 10^{-9}$ dan 4,477. Pengambilan ϵ_c pada bagian atas lapis tanah dasar tersebut valid untuk deformasi permanen akibat faktor lemahnya *subgrade*, bukan akibat faktor lapis-lapis perkerasan di atasnya.

Model Sistem Lapis Perkerasan dan Karakterisasi Material

Model sistem lapis perkerasan elastik yang digunakan dalam studi ini diilustrasikan pada Gambar 3. 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.

Beban bagi model sistem lapis perkerasan diformulasikan dari beban sumbu standar (*single-axle dual-tires*) seberat 18 kips, atau setara dengan 8,16 ton. Tekanan roda terhadap permukaan perkerasan (*contact pressure*) diasumsikan menggunakan nilai tipikal sebesar 0,55 MPa. Bidang

kontak diasumsikan berbentuk lingkaran dengan jari-jari 110 mm. Titik berat kedua roda pada satu sisi sumbu terpisahkan oleh jarak sejauh 33 cm.



Gambar 3 Model sistem lapis perkerasan

Tabel 2 Titik tinjau respon struktur

Respon struktur perkerasan	Arah horisontal (x)	Arah vertikal (z)
Regangan tarik arah horisontal (ϵ_t)	Posisi 1, 2, 3	0,005 cm di atas batas bawah lapis beraspal
Regangan desak arah vertikal (ϵ_v)	Posisi 1, 2, 3	0,005 cm di bawah garis batas tanah dasar

Respon struktur terhadap pembebanan tersebut ditinjau pada 6 titik sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Pada arah vertikal, posisi yang ditinjau adalah pada bagian bawah lapis perkerasan beraspal (0,005 cm di atas batas bawah lapis berbahan ikat aspal) untuk mendeteksi kerusakan retak leleh serta pada bagian atas lapis *subgrade* (kedalaman 0,005 cm dari batas tanah dasar) kerusakan deformasi permanen. Kedua lokasi tersebut pada arah horisontalnya ditinjau nilai regangannya pada titik-titik di tengah roda (posisi 1), di tepi roda (posisi 2), dan di tengah-tengah kedua roda pada satu sisi sumbu standar (posisi 3). Repetisi beban untuk memperoleh nilai respon struktur dalam simulasi Kenpave ditentukan sebanyak 3 kali.

Repetisi Beban Sumbu Standar Rencana

Data lalu lintas untuk perencanaan tebal perkerasan didasarkan pada Lalu lintas Harian Rata-rata (*LHR*) ruas jalan Pakem-Prambanan tahun 2017 (Tabel 3). Pembangunan dilakukan pada tahun 2018. Umur rencana ditetapkan 20 tahun dari tahun 2018. Diperkirakan rata-rata tingkat pertumbuhan lalu lintas pertahun mencapai 3,5%.

MDPJ Bina Marga 2017 menyediakan nilai faktor rusak kendaraan (*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).

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

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

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 lalulintas yang dihitung dengan Persamaan (5).

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

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

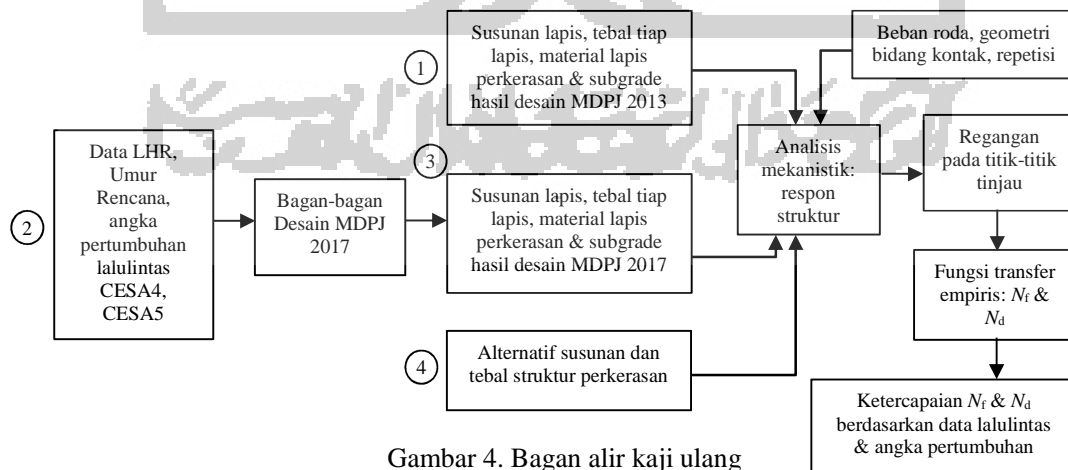
Tabel 3 Lalulintas Harian Rata-rata ruas Pakem-Prambanan

Gol.	Jenis Kendaraan	LHR 2017*	LHR 2018 ¹
1	Motor	1090	1128
2	Sedan, Jeep	1820	1884
3	Pick-up	833	862
4	Truk 2 As (<i>light</i>), Truk Kecil	746	772
5a	Bus Kecil	45	47
5b	Bus Besar	21	22
6a	Truk 2 As (kargo ringan)	97	100
6b	Truk 2 As (kargo sedang)	331	343
7a	Truk 3 As	9	9
7b	Trailer 4 As, Truk gandeng	2	2
7c	Truk Semi Trailer	2	2
8	Kendaraan Tidak Bermotor	186	193

*Sumber: P2JN Propinsi DIY. ¹Hasil perhitungan

Bagan Alir Kaji Ulang

Gambar 4 merangkum metode kaji ulang desain struktur perkerasan ruas jalan Pakem-Prambanan. Setiap nomor pada bagan alir berhubungan dengan pertanyaan-pertanyaan kajian yang disampaikan pada bagian Pendahuluan. Bagan alir tersebut bermuara pada diperolehnya prediksi perkiraan kerusakan struktural yang terjadi, berikut tahun terjadinya, pada desain struktur berdasarkan MDPJ 2013, MDPJ 2017, dan alternatif desain yang kerusakannya terjadi tidak lama setelah umur rencana 20 tahun tercapai.



Gambar 4. Bagan alir kaji ulang

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Desain Ulang berdasarkan MDPJ 2017

Berdasarkan data LHR 2018 pada Tabel 3, Persamaan (3), (4), dan (5) diperoleh nilai $CESA_4$ dan $CESA_5$ masing-masing sebesar 10.405.974 ESAL dan 9.964.746 ESAL. Berdasarkan nilai-nilai ini, dengan menggunakan rangkaian Bagan Desain MDPJ 2017 yang sesuai, diperoleh rekomendasi struktur perkerasan sebagaimana pada Tabel 4. Dengan nilai $CBR_{subgrade}$ sebesar 6,37% (data P2JN DIY), tidak diperlukan upaya perbaikan tanah dasar.

Tabel 4 Hasil Desain Struktur Perkerasan berdasarkan MDPJ 2013 dan 2017

Lapis Perkerasan	MDPJ 2013* (mm)	MDPJ 2017 ¹ (mm)
AC Wearing Course	40	40
AC Binder Course	60	60
AC Base	80	105
Lapis Pondasi Kelas A	300	300

*Sumber: P2JN DIY, ¹Hasil perhitungan

Dari Tabel 4 tampak bahwa MDPJ 2017 menyarankan struktur perkerasan yang relatif lebih tebal dibandingkan dengan hasil desain MDPJ 2013. Perbedaan hasil desain ini diindikasikan disebabkan oleh perbedaan data lalu lintas yang menjadi dasar perencanaan, mengingat desain ulang dengan MDPJ 2017 menggunakan data LHR yang lebih mutakhir, yaitu tahun 2017. Dengan struktur perkerasan yang lebih tebal pada bagian lapis berbahan ikat tentunya rekomendasi struktur MDPJ 2017 lebih kecil risikonya terhadap terjadinya kerusakan retak leleh sebelum perkerasan mencapai umur rencananya.

Respon Mekanistik Struktur Perkerasan

Analisis mekanistik menggunakan perangkat lunak Kenpave pada titik-titik tinjau sesuai Tabel 2 yang dilakukan terhadap hasil desain struktur perkerasan MDPJ 2013 dan 2017 (Tabel 4) berdasarkan model sistem lapis perkerasan pada Gambar 3 memberikan hasil sebagaimana ditabelkan pada Tabel 5. Dua buah alternatif struktur perkerasan (Alternatif-1 dan Alternatif-2) ditambahkan pula sebagai pembanding. Keduanya diperoleh dengan melakukan variasi tebal pada lapis berbahan ikat AC-Base.

Tabel 5 Respon mekanistik struktur perkerasan

Struktur Perkerasan	ϵ horisontal pada 0,005 cm di atas batas bawah lapis beraspal			ϵ vertikal pada kedalaman 0,005 cm dari batas tanah dasar		
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 1	Titik 2	Titik 3
MDPJ 2013 (40/60/80/300)	0,000209	0,0002119	0,0002079	0,00023	0,00025	0,00025
MDPJ 2017 (40/60/105/300)	0,000181	0,0001869	0,0001852	0,00021	0,00023	0,00023
Alternatif-1 (40/60/90/300)	0,0001973	0,0002015	0,0001986	0,00022	0,00024	0,00024
Alternatif-2 (40/60/100/300)	0,0001865	0,0001916	0,0001895	0,00021	0,00023	0,00023

Tabel 5 menunjukkan bahwa regangan tarik horisontal pada bagian bawah lapis berbahan ikat yang paling besar terjadi pada titik 2, yaitu di bawah tepi roda sumbu standar, sedangkan regangan desak arah vertikal pada bagian atas *subgrade* paling besar terjadi pada pertengahan jarak antar titik pusat kedua roda ataupun pada tepi roda (titik 3 atau 2). Nilai regangan pada titik-titik ini digunakan dalam analisis empiris selanjutnya.

Prediksi Nilai N_f , N_d , dan Ketercapaiannya

Hasil akhir kaji ulang berujung pada prediksi nilai N_f , N_d , dan ketercapaiannya berdasarkan data LHR 2018 (Tabel 3) dan asumsi tingkat pertumbuhan lalu lintas tertentu untuk setiap desain struktur perkerasan yang tercantum pada Tabel 5. Tabel 6 menyajikan hasil analisis tersebut. Dalam analisis ini digunakan laju pertumbuhan lalu lintas konstan sebesar 3,5% menurut nilai tipikal yang disarankan MDPJ 2017 (Bina Marga, 2017) untuk jalan fungsi kolektor daerah Pulau Jawa.

Tabel 6. Prediksi Nilai N_f , N_d , dan Ketercapaiannya

Struktur Perkerasan	CESA sebelum terjadi retak leleh (N_f)	Umur perkerasan mulai terjadi retak leleh (tahun)	CESA sebelum terjadi deformasi permanen (N_d)	Umur perkerasan mulai terjadi deformasi permanen (tahun)
MDPJ 2013 (40/60/80/300)	118.861.383	59	15.696.209	18
MDPJ 2017 (40/60/105/300)	192.587.439	72	27.208.089	27
Alternatif-1 (40/60/90/300)	143.398.813	64	20.248.800	22
Alternatif-2 (40/60/100/300)	174.717.037	69	24.697.193	25

Berdasarkan asumsi di atas, hasil desain berdasarkan MDPJ 2013 yang telah diimplementasikan untuk pekerjaan rekonstruksi ruas jalan Pakem-Prambanan memiliki resiko yang kecil untuk mengalami kerusakan retak leleh sebelum umur rencana 20 tahun tercapai. Lapis berbahan ikat dengan tebal total yang cukup tebal (18 cm) berkontribusi dalam hal ini. Kecenderungan untuk tidak mengalami kerusakan retak leleh sebelum 20 tahun juga didapati pada struktur-struktur lainnya yang kesemuanya memiliki lapis berbahan ikat yang lebih tebal.

Ditinjau dari kemungkinan mengalami deformasi permanen sebelum umur rencana tercapai, hasil desain berdasarkan MDPJ 2013 dipandang cukup beresiko. Apabila asumsi-asumsi yang digunakan dalam analisis berkesesuaian dengan kenyataan lapangan, 2 tahun sebelum umur rencana struktur perkerasan ini diprediksi telah mulai mengalami deformasi permanen. Lain halnya dengan hasil desain MDPJ 2017 yang menyarankan penebalan pada lapis AC-Base sebesar 2,5 cm diprediksi mampu mencegah terjadinya deformasi permanen sebelum tahun ke-27. Hal ini dipandang memberikan ruang keamanan yang cukup besar untuk desain berumur rencana 20 tahun. Selanjutnya, 2 alternatif struktur perkerasan berikutnya memberikan tingkat keamanan yang lebih optimum (kerusakan deformasi permanen pada umur 22 dan 25 tahun) dengan penambahan lapis AC-Base setebal 1 cm ataupun 2 cm saja.

SIMPULAN

Sebuah kaji ulang dengan pendekatan mekanistik-empiris telah dilakukan terhadap desain struktur perkerasan untuk pekerjaan rekonstruksi pada ruas jalan Pakem-Prambanan yang didasarkan pada MDPJ 2013. Hasil desain menunjukkan adanya resiko kerusakan deformasi permanen yang dapat terjadi lebih kurang 2 tahun sebelum umur rencana 20 tercapai. Desain yang didasarkan pada MDPJ 2017 memberikan ruang keamanan yang lebih baik, namun masih dapat dioptimalkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional (P2JN) Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang telah menyediakan data desain perkerasan dan lalu lintas harian rata-rata (LHR) untuk studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Khateeb, G., Gibson, N., Qi, X. (2007). Mechanistic Analyses of FHWA's Accelerated Loading Facility Pavements. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1990, Transportation Research Board of the National Academies: Washington, D.C., pp. 150–161.
- [2] Asphalt Institute (1982). *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1)*, 9th edition. Research Report 82-2.
- [3] Direktorat Jenderal Bina Marga (2013). *Manual Desain Perkerasan Jalan* No. 02/M/BM/2013
- [4] Direktorat Jenderal Bina Marga (2017). *Manual Desain Perkerasan Jalan* No. 04/SE/DB/2017
- [5] Ghadimi, B., Nikraz H., Rosano, M. Dynamic simulation of a flexible pavement layers considering shakedown effects and soil-asphalt interaction. *Transportation Geotechnics*, vol 7 (2016) pp. 40–58
- [6] Huang, Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. 2nd edition. Pearson Prentice-Hall: New Jersey.
- [7] Huebner, K. H., Dewhirst, D. L., Smith, D. E., Byrom, T. G. (2001). *The Finite Element Method for Engineers*. 4th edition. John Wiley and Sons: New York.
- [8] Shook, J. F., Finn, F. N., Witeczak, M. W., Monismith, C. L. (1982). Thickness Design of Asphalt Pavements – The Asphalt Institute Method. *Proceedings, 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, vol. 1 pp. 17 – 44