

ANALISIS PENGARUH MODULUS TANAH DASAR TERHADAP DESAIN STRUKTUR PERKERASAN LENTUR JALAN DAN OPTIMASINYA DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM PASTDEAN-M

Djunaedi Kosasih, Luthfi Chaliqi Taufiq

Abstrak

Perencanaan struktur perkerasan secara mekanistik-empirik mulai diperkenalkan di Indonesia dengan diterbitkannya Manual Desain Perkerasan Jalan No.02/M/BM/2013 pada tahun 2013; dan, semenjak itu manual ini telah mengalami beberapa kali revisi hingga terakhir pada tahun 2017 (MDPJ 2017). Secara umum, perencanaan struktur perkerasan secara mekanistik-empirik dapat lebih rasional menjelaskan pengaruh dari pembebanan lalu lintas, material perkerasan, lingkungan, dan variasi kondisi tanah dasar terhadap kinerja perkerasan. Penelitian ini secara khusus meninjau pengaruh dari variasi modulus tanah dasar terhadap kebutuhan tebal perkerasan melalui kajian terhadap katalog desain perkerasan lentur yang disediakan pada Bagan Desain 3B-3C dalam dokumen MDPJ 2017. Bagan Desain tersebut memberikan beberapa opsi desain perkerasan lentur untuk tiap rentang jumlah pengulangan beban lalu lintas dan modulus tanah dasar. Program PastDean-M digunakan dalam proses kalkulasi respon struktur perkerasan akibat pembebanan roda pada perkerasan dengan menggunakan teori elastis multi-lapisan. Berdasarkan model kerusakan retak lelah dan deformasi permanen, program PastDean-M juga menghitung jumlah pengulangan beban yang dapat dilayani oleh struktur perkerasan hingga kriteria kegagalan terpenuhi. Seperti yang diharapkan nilai modulus tanah dasar terbukti sangat mempengaruhi desain tebal lapis perkerasan lentur. Selain itu, tebal perkerasan yang disediakan pada Bagan Desain 3B-3C dalam dokumen MDPJ 2017 dapat dioptimasi.

Kata Kunci: Modulus Tanah Dasar, Program PastDean-M, Mekanistik-Empirik, MDPJ, Katalog Desain Perkerasan

Abstract

Mechanistic-empirical pavement structure design method was introduced in Indonesia through the publication of Manual Desain Perkerasan Jalan No.02 / M / BM / 2013 in 2013 and since then it has been through several revisions until recently in 2017 (MDPJ 2017). In general, mechanistic-empirical pavement design method is known for the ability to more rationally explain the influence of various factors on pavement structural performance, including variations in subgrade conditions. This study specifically reviewed the effect of subgrade modulus variations on the pavement thickness requirement through a study of the flexible pavement design catalog provided in Design Chart 3B-3C in the 2017 MDPJ document. The Design Chart provides several flexible pavement design options for each range of wheel-load repetitions and subgrade modulus. The PastDean-M program is used in the strain calculation process that occurs due to wheel loading on pavement using the multi-layer elastic theory. Based on fatigue cracking and permanent deformation failure models, the PastDean-M program also calculates the amount of repetition of load that can be served by the pavement structure until the failure criteria are met. From the analysis, it is known that the modulus of subgrade greatly influences the needs of the flexible pavement thickness. It is also known that the pavement thickness provided in the 3B-3C Design Chart in the 2017 MDPJ document can be optimized.

Keyword: Subgrade Modulus, PastDean-M Program, Mechanistic-Empirical, MDPJ, Pavement Design Catalog

Pendahuluan

Metode perencanaan struktur perkerasan secara mekanistik telah berkembang cukup pesat dalam 3 dekade terakhir. Hal ini didukung oleh berkembangnya program komputer yang berperan dalam proses kalkulasi respon struktur perkerasan terhadap beban roda kendaraan. Perencanaan struktur perkerasan dengan metode desain mekanistik secara umum lebih baik dibandingkan dengan metode desain empiris karena kemampuannya dalam mempertimbangkan kondisi lingkungan setempat dengan lebih rasional dan dapat menghasilkan tebal lapis perkerasan yang proporsional dengan karakteristik material yang digunakan.

Perencanaan perkerasan dengan metode mekanistik mulai diperkenalkan dan diterapkan di Indonesia melalui pedoman Manual Desain Perkerasan Jalan No.02/M/BM/2013 (MDPJ 2013). Pedoman tersebut telah mengalami revisi yang diterbitkan pada tahun 2017 (MDPJ 2017). Dokumen MDPJ 2017 menyediakan Bagan Desain 3B dan 3C sebagai desain perkerasan lentur untuk beberapa kondisi pengulangan beban lalu lintas dengan pertimbangan biaya terendah. Bagan Desain 3B menyediakan beberapa katalog desain perkerasan lentur untuk rentang nilai kumulatif beban sumbu selama 20 tahun (10^6 ESA5). Untuk mengakomodasi variasi kondisi kekuatan tanah dasar, Bagan Desain 3C memberikan penyesuaian tebal lapis fondasi untuk tanah dasar dengan nilai CBR > 6%. Melalui Bagan Desain ini, pada dasarnya dokumen MDPJ 2017 telah mengakomodasi variasi kondisi tanah dasar dalam proses perencanaan struktur perkerasan. Dengan demikian, pengguna pedoman hanya perlu untuk mengestimasi jumlah kumulatif beban selama umur rencana dan menentukan nilai CBR desain yang akan digunakan.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis sensitivitas pengaruh nilai modulus tanah dasar

terhadap kebutuhan tebal lapisan perkerasan untuk melayani jumlah pengulangan beban lalu lintas tertentu. Melalui analisis tersebut, dapat dilakukan optimasi terhadap desain struktur perkerasan lentur yang disediakan pada Bagan Desain 3B-3C di dalam dokumen MDPJ 2017.

Desain Struktur Perkerasan Lentur Untuk Berbagai Modulus Tanah Dasar

Dokumen MDPJ 2017 memberikan desain awal struktur perkerasan lentur sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Tabel 1 merupakan Bagan Desain 3B yang berisi katalog desain perkerasan lentur untuk berbagai rentang nilai kumulatif pengulangan beban lalu lintas selama 20 tahun. Variasi rentang nilai akumulasi pengulangan beban lalu lintas diakomodasi melalui penyesuaian terhadap tebal lapisan AC Base. Tabel 2 merupakan Bagan Desain 3C yang berisi penyesuaian terhadap tebal lapis fondasi untuk mengakomodasi tanah dasar dengan nilai CBR > 6%. Desain yang diberikan pada kedua bagan desain tersebut merupakan desain awal yang selanjutnya dapat dioptimasi sesuai dengan kondisi lingkungan setempat melalui analisis menggunakan program PastDean-M.

Kriteria Desain Struktur Perkerasan Lentur

Kriteria desain (atau dalam dokumen MDPJ 2017 disebut fungsi transfer) merupakan fungsi yang menghubungkan respon material perkerasan (tegangan, regangan, lendutan) terhadap beban dengan kinerja perkerasan. Program PastDean-M mengadopsi kriteria desain yang disediakan dalam dokumen MDPJ 2017 dan Asphalt Institute sebagai berikut.

a. Kriteria desain retak leleh lapis beraspal

- Model retak leleh MDPJ

Dokumen MDPJ mengadopsi model kerusakan retak lelah yang dikembangkan oleh AUSTRROAD.

Model kerusakan tersebut merupakan fungsi dari regangan tarik horizontal yang terjadi pada bagian bawah lapisan beraspal, dan karakteristik campuran lapis beraspal (V_b dan S_{mix})

$$N = RF \left[\frac{6918 \times (0,856V_b + 1,08)}{S_{mix}^{0,36} \mu\epsilon} \right]$$

- N = Jumlah repetisi izin lintasan beban sumbu standar
- $\mu\epsilon$ = Regangan tarik horizontal pada lapis beraspal (microstrain)
- V_b = Volume aspal dalam campuran
- S_{mix} = Modulus campuran aspal (MPa)
- RF = Faktor reliabilitas

• **Model retak lelah Asphalt Institute**

Model kerusakan retak lelah lapis beraspal yang dikembangkan oleh Asphalt Institute juga merupakan fungsi dari regangan tarik horizontal yang terjadi pada bagian bawah lapisan beraspal dan karakteristik campuran lapis beraspal (V_b , V_v , dan E_p)

$$N = 18,4 \left(10^{4,84 \left(\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0,69 \right)} \right) (0,004325 \epsilon_t^{-3,291}) (144,8582 E_p)^{-0,854}$$

- N = Jumlah repetisi izin lintasan beban sumbu standar
- ϵ_t = Regangan tarik horizontal pada lapis

beraspal (microstrain)

- V_b = Volume aspal dalam campuran
- V_v = Volume rongga dalam campuran
- E_p = Modulus campuran aspal (MPa)

b. Kriteria desain deformasi permanen

• **Model deformasi permanen MDPJ**

Dokumen MDPJ mengadopsi model kerusakan deformasi permanen yang dikembangkan oleh AUSTRROAD yang merupakan fungsi dari regangan vertikal yang terjadi pada permukaan tanah dasar.

$$N = \left(\frac{9300}{\mu\epsilon} \right)^7$$

- N = Jumlah repetisi izin lintasan beban sumbu standar
- $\mu\epsilon$ = Regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar (microstrain)

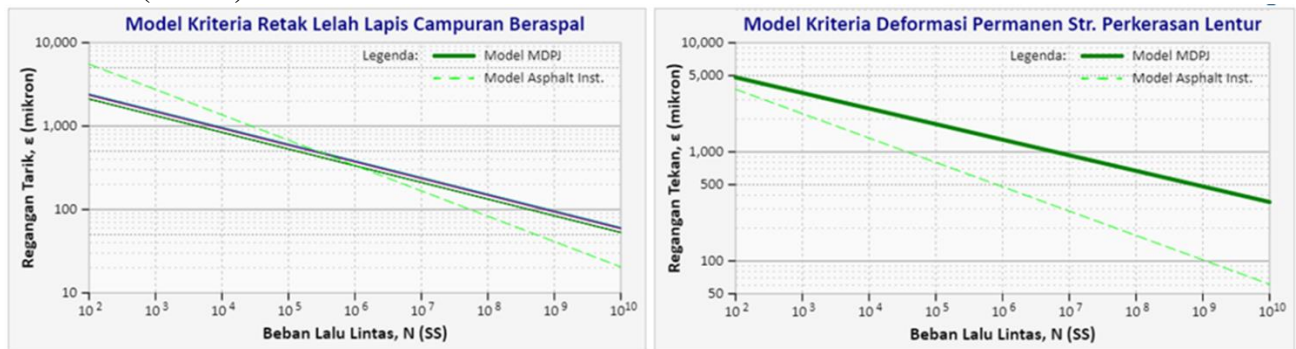
• **Model deformasi permanen Asphalt Institute**

Model kerusakan deformasi permanen yang dikembangkan oleh Asphalt Institute juga merupakan fungsi dari regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar.

$$N = 0,001365 \epsilon_c^{-4,477}$$

- N = Jumlah repetisi izin lintasan beban sumbu standar
- ϵ_c = Regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar (microstrain)

Gambar 1 Model kerusakan Retak Lelah Lapis Campuran Beraspal (kiri) dan Deformasi Permanen (Kanan)



Tabel 1 Desain Perkerasan Lentur – Aspal Dengan lapis Fondasi Berbutir

	STRUKTUR PERKERASAN								
	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9
	Solusi yang dipilih				Lihat Catatan 2				
Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10^6 ESA5)	< 2	≥ 2 - 4	> 4 - 7	> 7 - 10	> 10 - 20	> 20 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 200
	KETEBALAN LAPIS PERKERASAN (mm)								
AC WC	40	40	40	40	40	40	40	40	40
AC BC	60	60	60	60	60	60	60	60	60
AC Base	0	70	80	105	145	160	180	210	245
LPA Kelas A	400	300	300	300	300	300	300	300	300

Sumber: MDPJ 2017

Tabel 2 Penyesuaian Tebal Lapis Fondasi Agregat A Untuk Tanah Dasar CBR ≥ 6 %

	STRUKTUR PERKERASAN								
	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9
Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10^6 CESA5)	> 2	> 2 - 4	> 4 - 7	> 7 - 10	> 10 - 20	> 20 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 200
	TEBAL LFA A (mm) PENYESUAIAN TERHADAP BAGAN DESAIN - 3B								
Subgrade CBR > 6 - 7	400	300	300	300	300	300	300	300	300
Subgrade CBR > 7- 10	330	220	215	210	205	200	200	200	200
Subgrade CBR ≥ 10	260	150	150	150	150	150	150	150	150
Subgrade CBR ≥ 15	200	150	150	150	150	150	150	150	150

Sumber: MDPJ 2017

Program PastDean-M

Program PastDean-M merupakan program komputer berbasis web yang dapat diakses secara daring. Program ini mendukung penerapan metode desain mekanistik yang diperkenalkan oleh MDPJ 2017. PastDean-M dilengkapi fitur analisis respon material terhadap konfigurasi pembebanan tertentu menggunakan teori elastis multi-lapisan. Selain itu dalam keterkaitannya dengan modulus tanah dasar, program ini dilengkapi dengan fitur pengolahan data CBR khususnya dalam proses penentuan nilai CBR wakil menggunakan metode beda kumulatif (AASHTO, 1993). Gambar 2 menunjukkan tampilan modul desain perkerasan

lentur dalam program PastDean-M. Secara garis besar proses desain perkerasan lentur menggunakan PastDean-M mengikuti alur desain dalam pedoman MDPJ. Proses desain diawali dengan input jumlah, jenis, serta karakteristik lapis perkerasan. Kemudian dilanjutkan dengan input karakteristik roda dan beban yang bekerja serta pemilihan model kerusakan yang digunakan.

Hasil yang didapat dari analisis menggunakan program PastDean-M adalah respon perkerasan serta umur layan/jumlah pengulangan beban yang mampu dilayani seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Karakteristik perkerasan selanjutnya dapat disesuaikan hingga diperoleh target umur layan yang diinginkan.

Gambar 2 Tampilan Muka Modul Desain Perkerasan Program PastDean-M

Pavement Structure Data

Jumlah Lapisan: Load Repetition (mil): Range: Life (yr):

Layer	Layer Type	D (mm)	CBR (%)	E (MPa)	μ	V _b (%)	V _v (%)	SP ₁ (°C)	P ₁ (dmm)	P ₂₀₀ (%)	T (°C)
Layer #1 (top)	AC-WC	40.00	0.00	1100	0.40	12.20	4.00	50.00	60.00	5.00	41.00
Layer #2	AC-BC	60.00	0.00	1200.00	0.40	11.50	4.00	50.00	60.00	5.00	41.00
Layer #3	AC-Base	245.00	0.00	1600.00	0.40	11.50	4.00	50.00	60.00	5.00	41.00
Layer #4	LPA Kelas A	250.00	100.00	150.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Layer #5 (bottom)	Subgrade	0.00	6.00	70	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Wheel Load Data

Wheel Load (KN): No. of Wheels: Axle Load (KN):

Tyre Pressure (KPa): Contact Rad. (mm):

Wheel Spacing (mm): Axle Width (m): Axle Spacing (m):

Computation Options

Data Number: Data Name: Tahun Data: Design Reliability (%):

Base output filename (.txt not required):

Fatigue cracking model: Vehicle Speed, V (kph):

Permanent deformation model: Loading Time, t (sec):

Fatigue cracking model (for cemented layer): Permanent Deformation Factor, F_r:

Gambar 3 Keluaran Program PastDean-M

(Total execution time = 0.859 sec)

Design Loading, N = 200.000 mESA Dual Wheel Load, P = 40.00 KN
 Tyre Pressure, q = 750.0000 KPa
 Contact Radius, r = 92.13 mm
 Wheel Spacing, s = 340.00 mm

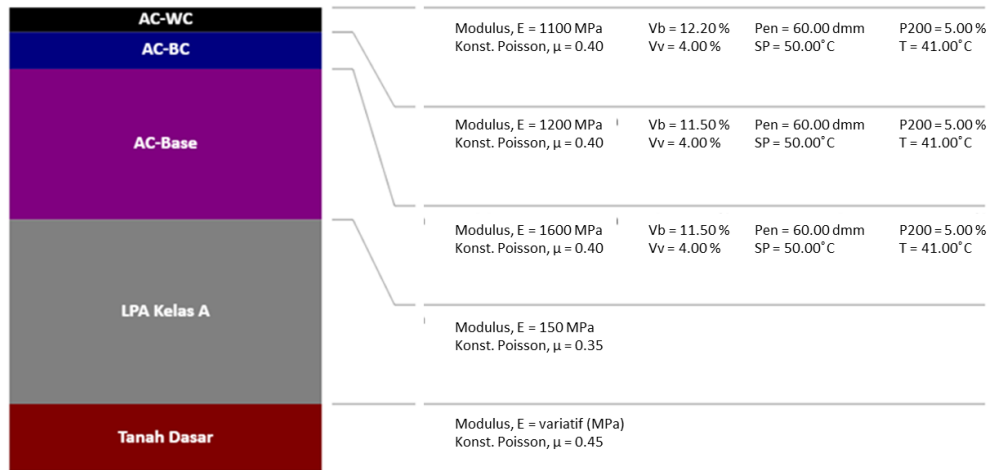
No. of Layers = 5

Layer	H (mm)	E (MPa)	μ
1	40.00	1,100.00	0.40
2	60.00	1,200.00	0.40
3	245.00	1,600.00	0.40
4	300.00	150.00	0.35
5	0	60.00	0.45

Pavement Layer	Design Criteria	Structural Response	Responses at:			Critical Response	(unit)	Position	N (mill.)	Check
			Point #1	Point #2	Point #3					
AC-WC	Deflection	d	389.507	364.485	330.145	-	(micron)	-	-	-
	Cracking	ϵ_t	51.660	27.101	117.316	117.316	(x 10 ⁻⁶)	3	485.82	ok
AC-BC	Cracking	ϵ_t	63.983	38.179	31.200	63.983	(x 10 ⁻⁶)	1	6,591.22	ok
AC-Base	Cracking	ϵ_t	105.893	111.636	114.475	114.475	(x 10 ⁻⁶)	3	214.21	ok ✓
LPA Kelas A	-	ϵ_t	88.284	91.398	95.182	-	(x 10 ⁻⁶)	-	-	-
Subgrade	Rutting	ϵ_c	-189.084	-199.445	-205.840	-205.840	(x 10 ⁻⁶)	3	384,300.15	ok

Predicted pavement life, N = 214.21 (mill.) where: V_b = 11.50%; V_v = 4.00%; SP₁ = 50.00 °C; Pen = 60.00 dmm
 Design is governed by fatigue cracking criterion. ... **OK.** f = 0.167 sec; T = 0.0°C; P₂₀₀ = 5.00%; E = 1,600.00 MPa
 F_r = 1.00; P_r = 95.0%

Gambar 4 Karakteristik Lapis Perkerasan



Analisis Pengaruh Modulus Tanah Dasar Pada Desain Perkerasan Lentur

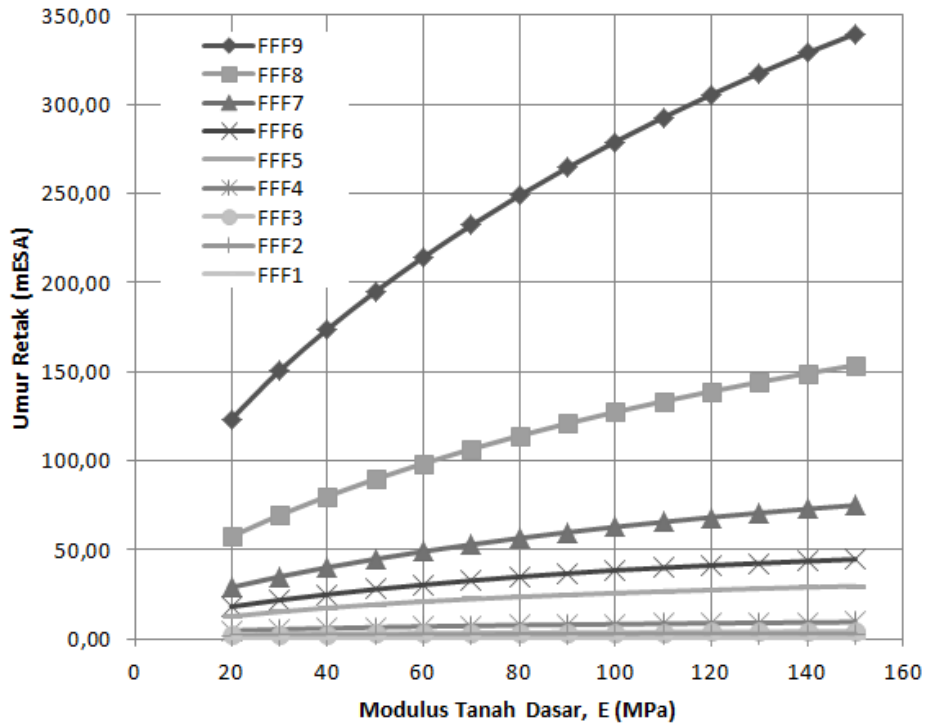
Dalam penelitian ini ditinjau katalog desain perkerasan lentur yang tersedia pada Bagan Desain 3B dalam dokumen MDPJ. Desain tersebut disediakan untuk berbagai rentang pengulangan beban pada kondisi tanah dasar dengan CBR 6-7% (Modulus \approx 60-70 MPa). Bagan Desain 3C memberikan penyesuaian tebal lapis fondasi agregat A untuk rentang nilai CBR tanah dasar yang lebih tinggi sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2. Untuk menilai pengaruh modulus tanah dasar terhadap desain perkerasan lentur pada tiap katalog yang tersedia, dilakukan analisis umur retak dan umur alur dengan variasi nilai modulus tanah dasar 20-150 MPa. Gambar 4 memperlihatkan karakteristik lapis perkerasan yang dijadikan masukan ke program PastDean-M dalam penelitian ini. Dari analisis, diketahui untuk

semua katalog desain, umur retak merupakan kriteria yang menentukan dibandingkan umur alur. Tabel 3 dan Gambar 5 memperlihatkan hasil analisis pengaruh variasi modulus tanah dasar terhadap umur retak struktur perkerasan tiap katalog dalam desain 3B. Selain itu, melalui analisis ini dapat diidentifikasi katalog desain yang dapat dioptimasi. Sebagai contoh, untuk kondisi tanah dasar dengan modulus 60 MPa (CBR \approx 6%), umur retak perkerasan FFF9 melebihi rentang atas jumlah pengulangan beban roda yang direncanakan dalam katalog (214 mESA > 200 mESA). Artinya, desain perkerasan lentur FFF9 dapat dioptimasi lebih lanjut baik melalui penyesuaian tebal material fondasi maupun lapis berpengikat.

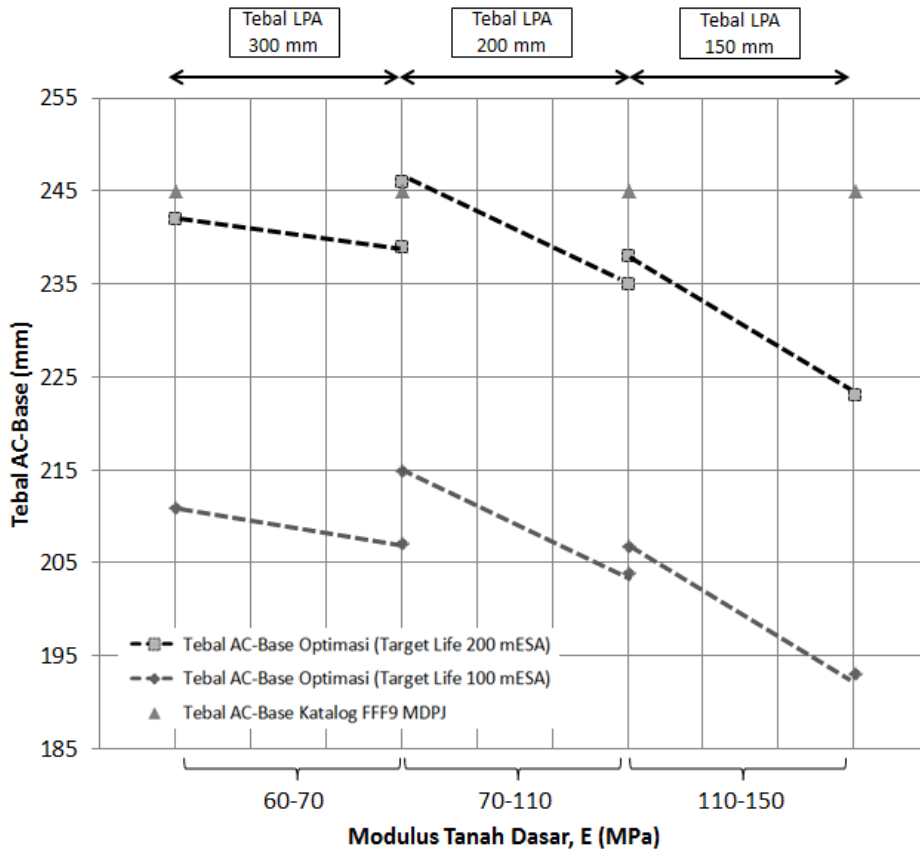
Tabel 3 Umur Retak (mESA) Tiap Katalog Desain Dengan Variasi Modulus Tanah Dasar

Modulus Tanah Dasar, E (MPa)	Umur Alur (mESA) untuk Katalog Desain FFF9	Umur Retak (mESA), untuk berbagai Katalog Desain:								
		FFF9	FFF8	FFF7	FFF6	FFF5	FFF4	FFF3	FFF2	FFF1
20	11.253,1	123,23	57,30	28,85	18,03	12,61	4,46	2,16	1,56	0,18
30	40.440,7	150,40	69,39	34,80	21,68	15,11	5,24	2,48	1,77	0,18
40	102.872,3	173,72	80,01	40,03	24,87	17,29	5,86	2,73	1,93	0,18
50	206.949,1	194,82	89,61	44,73	27,72	19,22	6,38	2,94	2,07	0,18
60	384.300,15	214,21	98,40	48,99	30,29	20,88	6,83	3,12	2,19	0,18
70	672.687,0	232,18	106,49	52,89	32,62	22,25	7,23	3,27	2,29	0,18
80	1.124.050,3	248,89	113,96	56,46	34,74	23,48	7,58	3,41	2,38	0,18
90	1.808.240,0	264,48	120,89	59,74	36,68	24,58	7,90	3,54	2,47	0,18
100	2.817.376,9	279,07	127,32	62,77	38,42	25,59	8,19	3,65	2,54	0,18
110	4.270.903,0	292,74	133,32	65,57	39,84	26,51	8,46	3,75	2,61	0,18
120	6.321.372,4	305,57	138,91	68,18	41,16	27,35	8,70	3,85	2,67	0,18
130	9.161.041,0	317,63	144,14	70,60	42,37	28,14	8,93	3,93	2,73	0,18
140	13.029.309,7	329,00	149,04	72,85	43,50	28,86	9,13	4,01	2,78	0,18
150	18.221.078,9	339,71	153,64	74,96	44,54	29,54	9,33	4,09	2,82	0,18

Gambar 5 Pengaruh Variasi Modulus Tanah Dasar Terhadap Umur Layan Perkerasan Bagan Desain 3B



Gambar 6 Optimasi Katalog FFF9



Tabel 4 Penyesuaian Bagan Desain 3B-Dokumen MDPJ

Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10 ⁶ ESA5)	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9
	<2	>=2-4	> 4 - 7	> 7 - 10	>10 - 20	> 20 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 200
Ketebalan lapis Perkerasan (mm)									
AC WC	40	40	40	40	40	40	40	40	40
AC BC	60	60	60	60	60	60	60	60	60
AC Base	0	67-88	86-106	104-119	117-144	142-160	157-181	178-211	208-242
LPA Kelas A	400	300	300	300	300	300	300	300	300

Tabel 5 Penyesuaian Tebal Lapis AC-Base Untuk Tiap Kondisi Kekuatan Tanah Dasar

Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10 ⁶ ESA5)	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9
	<2	>=2-4	> 4 - 7	> 7 - 10	>10 - 20	> 20 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 200
Tebal AC-Base (mm) Penyesuaian Terhadap Bagan Desain 3B									
Subgrade CBR > 6 - 7	0	67-88	86-106	104-119	117-144	142-160	157-181	178-211	208-242
Subgrade CBR > 7 - 10	1	66-90	86-110	103-123	116-148	140-165	155-186	175-215	204-246
Subgrade CBR >= 10	2	62-89	81-107	97-119	109-143	133-158	147-178	166-207	194-238
Subgrade CBR >= 15	3	Maks. 81	Maks. 97	Maks. 109	Maks. 133	Maks. 147	Maks. 166	Maks. 194	Maks. 223

Optimasi Desain

Dalam studi ini ditinjau optimasi katalog perkerasan lentur Bagan Desain 3B-3C. Optimasi dilakukan terhadap kebutuhan tebal lapis AC-Base Gambar 6 menunjukkan contoh optimasi katalog FFF9. Katalog tersebut dirancang untuk melayani rentang pengulangan beban 100-200 mESA. Rentang nilai pengulangan beban tersebut dirasa cukup jauh. Idealnya struktur perkerasan yang direncanakan untuk melayani pengulangan beban 100 mESA memiliki tebal yang lebih tipis dibandingkan dibandingkan dengan pengulangan beban 200 mESA.

Dengan menggunakan program PastDean-M, dapat dilakukan iterasi sehingga diperoleh tebal perkerasan yang secara spesifik melayani pengulangan beban tertentu dan pada kondisi kekuatan tanah dasar tertentu pula. Sebagai contoh dari Gambar 6 dapat dipahami untuk melayani pengulangan beban sebanyak 100 mESA pada kondisi modulus tanah dasar 60 MPa, hanya dibutuhkan lapis AC-Base setebal 208 mm (≈210 mm). Pada kondisi yang sama, tebal AC-Base pada Katalog FFF9 adalah 245 mm. Artinya terdapat selisih sebesar ≈35 mm antara desain tebal AC-Base hasil iterasi

menggunakan Program PastDean-M dan katalog FFF9. Maka melalui penelitian ini diusulkan penyesuaian terhadap Bagan Desain 3B (Tabel 4) serta penyesuaian tebal lapis AC-Base untuk berbagai kondisi kekuatan tanah dasar (Tabel 5)

Kesimpulan

Melalui analisis secara mekanistik menggunakan program PastDean-M dapat disimpulkan bahwa seperti yang diharapkan, parameter modulus tanah dasar mempengaruhi umur layan dari struktur perkerasan. Dari hasil analisis diusulkan pula optimasi desain perkerasan Bagan Desain 3B berupa penyesuaian tebal lapis AC-Base.

Ucapan Terima Kasih

Daftar Pustaka

- Kementerian PUPR. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan No.02/M/BM/2017. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Kosasih, D. (2019). Manual Pengoperasian Program PastDean-M . Bandung: LPIK