

Pengembangan Modulus Elastisitas Campuran Beraspal, Standard Load Group, dan Angka Ekuivalen pada Manual Desain Perkerasan (MDP)

Aloysius Tjan

Universitas Katolik Parahyangan - Program Studi Teknik Sipil
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung. E-mail: aloysius@unpar.ac.id

Abstrak

Akurasi prediksi modulus campuran beraspal (yang tergantung pada banyak hal antara lain temperatur atau WMAPT), standar load group, angka ekuivalen (ESA4, ESA5, SAR5, SAR7, SAR12) penting dalam proses desain perkerasan lentur. Ke tiga hal tersebut dibahas dalam makalah ini. Modulus campuran beraspal yang diprediksi MDP terlalu besar daripada nilai modulus berdasarkan AI. Koefisien yang disarankan MDP untuk memprediksi modulus pada temperatur yang berbeda dari 41°C tidak dapat dikonfirmasi sebagai koefisien yang benar, karena koefisien (kalaupun ada) besarnya tidak konstan untuk semua kasus. Penentuan standard load group (sumbu tunggal roda tunggal, tandem, dan tripel) seharusnya mempunyai dampak kerusakan yang sama seperti sumbu standar. Namun berdasarkan hasil analisis ini tidak dapat mengkonfirmasi bahwa penentuan standar load group tersebut merupakan hal yang benar. Dampak kerusakan standar load group berkisar antara 0.21 sd 11.48 kerusakan sumbu standar – padahal seharusnya (jika benar) adalah 1.0. Penggunaan ESA4, ESA5 pada MDP berbeda dari penggunaannya pada Austroads. Selain itu ada SAR7 dan SAR12 yang perlu digunakan dalam proses desain – yang tidak dikenal dalam MDP. Berdasarkan hasil analisis ini, maka ketiga hal tersebut dalam MDP perlu ditelaah lebih lanjut. Akumulasi kekeliruan dari setiap hal tersebut dapat menyebabkan kesalahan yang fatal dalam desain.

Kata kunci: Modulus campuran beraspal, standard load group, ESA, ESA5, SARm.

Abstract

Accurate prediction of bituminous mix moduli (which depends on various factor such as pavement temperature), standard load group, and equivalency factors (ESA, ESA5, SAR5, SAR7, SAR12) are important in the flexible pavement design process. Those three parameters are thoroughly discussed. MDP determined bituminous mix moduli higher than the AI. A constant coefficients suggested to have the mix moduli other than standard temperature (41°C) are not confirmed from the analysis. It is supposed that standard load group (single axle single wheel, tandem, and tridem) has the same damaging effect as standard axle. From the analysis, the damaging effect of standard load group are varies from 0.21 upto 11.48 of the standard axle's. Parameters ESA4 and ESA5 in MDP are used differently compared to the Austroads. In addition to that there are parameters SAR7 and SAR12 which are not existed in MDP. The suggested bituminous mixture moduli, standar load group, and equivalency factor (ESA4, ESA5) in MDP need to be reconsidered. Accumulation of the in accuracy from each of these may results to a in appropriate design.

Keywords: Modulus of bituminous mix, standard load group, ESA, ESA5, SARm.

1. Pendahuluan

Pada tahun 2017 telah diterbitkan Manual Desain Perkerasan Jalan (Zamhari, James, & Jameson, 2017). Manual ini merupakan versi terakhir setelah beberapa kali revisi sejak pertama kali diterbitkan yaitu pada tahun 2013 – berupa Manual Desain Perkerasan Jalan 2013 (James & Jameson, 2013). Ada hal baru di Indonesia dengan diterbitnya manual tersebut, yaitu desain perkerasan jalan yang berdasarkan pendekatan mekanistik empiris. Manual desain dengan pendekatan mekanistik empiris ini mengacu sangat erat pada pedoman desain perkerasan di Australia, yaitu Austroads (2008). Sebenarnya ada banyak pedoman desain perkerasan lentur dengan pendekatan mekanistik empiris, seperti antara lain Shell (1978), Asphalt Institute (1991). Dalam manual desain itu tidak ada penjelasan mengapa pedoman desain Austroads (2008) yang dipilih. Dari nama-nama penulis dari manual versi

awal diketahui bahwa mereka berasal dari Australia, dan penulisan manual merupakan proyek INDII (Indonesia Infrastructure Initiative) yang didanai oleh Australia Aid.

Topik yang menjadi fokus penelitian ini adalah angka ekuivalen ESA4 dan ESA5 pada manual desain, yaitu pangkat 4 dan 5 pada perhitungan angka ekuivalen. Ketika mempelajari Austroads (2008) selain pangkat 4 dan 5, juga terdapat konstanta pangkat 7 dan 12. Selama ini di Indonesia dikenal pangkat untuk angka ekuivalen adalah 4, seperti pada SNI 03-1732 (1989) dan Pd T05-2005-B (2005). Pada pedoman terakhir, rumus angka ekuivalen serupa dengan yang terdapat pada metode Austroads (1992).

Angka ekuivalen adalah komponen yang penting dalam proses konversi kendaraan yang lewat pada lajur rencana. Berbagai jenis dan berat sumbu dari

kendaraan dikonversikan dampak kerusakan yang ditimbulkannya menjadi seperti akibat beban sumbu standar, yaitu sumbu tunggal roda ganda dengan beban 8.16 ton (atau 80 kN, atau 18 kips). Pemahaman yang jelas dan benar tentang konversi ini menjadi penting.

2. Tujuan Penelitian

Penelitian tentang berbagai aspek konversi berbagai berat dan jenis sumbu berdasarkan konsep pedoman Austroads (2008) tanpa mempermasalahkan hubungan regangan tarik dengan umur lelah maupun regangan tekan dengan umur deformasi yang digunakan pada pedoman tersebut. Secara detail penelitian mempunyai fokus pada:

- Angka ekuivalen sumbu tunggal roda tunggal
- Angka ekuivalen sumbu tunggal roda ganda
- Angka ekuivalen sumbu tandem
- Angka ekuivalen sumbu tripel
- Standard Axle Repetition
- Faktor koreksi modulus campuran beraspal untuk WMAPT yang berbeda dari 41°C

3. Tinjauan Pustaka

3.1 ESA4, ESA5, traffic multiplier, ESA, SAR5,

Dampak kerusakan akibat sumbu kendaraan tergantung kepada jenis dan berat sumbu. Salah satu jenis sumbu dan beratnya ditentukan sebagai sumbu standar, yaitu sumbu tunggal roda ganda 8.16 t (pada semua versi Austroads ditulis 8.2 t), dan jika digunakan satuan yang lain menjadi 18 kips, 18,000 lbs, atau 80 kN. Satu lintasan sumbu standar ini menimbulkan kerusakan yang sama dengan sumbu lain sebagai berikut (Pd T05-2005-B, 2005 dan berbagai versi Austroads), atau yang dikenal sebagai standard load group (SL):

- Sumbu tunggal roda tunggal = 5.4 t (pada Austroads 53 kN)
- Sumbu tandem = 13.76 t (135 kN)
- Sumbu tripel = 18.45 t (181 kN)

Beberapa dasar penetapan angka-angka itu menurut hasil penelitian Scala (1970), yang menyatakan lendutan maksimum yang sama menyebabkan kerusakan yang sama pula. Berdasarkan prinsip itu, dicari beban pada sumbu bukan standar yang mengakibatkan kerusakan yang sama dengan sumbu standar. Beban sumbu tunggal roda tunggal sebesar 11.6 kips (51.6 kN) menyebabkan lendutan yang sama

dengan sumbu standar (sumbu tunggal roda ganda) 18 kips (80 kN). Untuk memudahkan perhitungan beban sumbu itu diambil 12 kips (51.6 kN). Untuk sumbu tandem Scala memberikan dua angka yaitu 28.9 kip (128.6 kN) dan 29.2 kip (129.9 kN) dan diambil beban 30 kip sumbu tandem memberikan dampak kerusakan yang sama dengan sumbu standar. Sedangkan untuk sumbu tripel, bebannya 40.7 kips (181.0 kN). Stevenson (1976) mengadopsi studi Scala menjadi sumbu tandem 13.6 t (133.4 kN), dan sumbu tripel 18.5 t (181.5 kN). Sedangkan pada Austroads (1992) nilai itu menjadi sumbu tunggal roda tunggal 53 kN, sumbu standar (sumbu tunggal roda ganda) 80 kN, sumbu tandem 135 kN, dan sumbu tripel 181 kN. Indonesia mengadopsi dokumen ini menjadi Pd T05-2005-B (2005), dengan berat masing-masing sumbu adalah sumbu tunggal roda tunggal 5.4 t (52.9 kN), sumbu standar 8.16 t (80 kN), sumbu tandem 13.76 t (134.9 kN), dan sumbu tripel 18.45 t (180.9 kN).

Menurut Austroads, dampak kerusakan akibat beban yang berbeda dari SL_i dihitung dengan **Persamaan 1**. Nilai yang diperoleh dari **Persamaan 1** tersebut adalah Standard Axle Repetitions (SAR). SAR ini dibedakan berdasarkan nilai pangkat m yang dipakai. Nilai m ini ditentukan berdasarkan metode desain serta jenis kerusakan perkerasan yang terjadi (**Tabel 1**). Sehingga ada SAR5 untuk SAR yang dihitung berdasarkan nilai $m = 5$. Di MDP, notasi SAR tidak dikenal, sehingga yang SAR5 ditulis sebagai ESA5. Untuk menyatakan SAR4, Austroads menggunakan ESA, sedangkan pada MDP menuliskannya sebagai ESA4.

$$SARm_{ij} = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i} \right)^m \tag{1}$$

Menurut MDP (Zamhari, James, & Jameson, 2017), penggunaan ESA4 (pada Austroads = ESA) dan ESA5 (pada Austroads = SAR5) adalah sebagai berikut:

- ESA4 digunakan untuk desain perkerasan lentur dengan umur rencana 20 tahun dan kurang dari 4 juta ESA;
- ESA5 untuk perkerasan lentur dengan lapis pondasi batu pecah yang didesain dengan umur rencana 20 tahun dan lebih dari 4 juta ESA. Untuk desain lebih dari 10 juta ESA, lapis pondasi berbahan pengikat (cemented) dianggap lebih efisien dari pada untreated granular;
- Lapis permukaan pada perkerasan lentur adalah campuran beton aspal, jika beban lebih dari 10 juta ESA dianjurkan digunakan campuran beton aspal modifikasi SBS (Styrene Butadiene Styrene).

Tabel 1. Nilai m dari standard axle repetition

Metode Desain	Jenis Perkerasan	Jenis Kerusakan	Nilai m	Satuan
Empiris	Perkerasan dengan material berbutir dan lapis permukaan yang tipis	Semua jenis kerusakan	4	ESA
		Retak lelah pada lapis beraspal	5	SAR5
Mekanistik empiris	Perkerasan dengan satu atau lebih lapis berbahan pengikat	Retak lelah pada bahan berpengikat portland cement	12	SAR12
		Alur dan kehilangan bentuk	7	SAR7

- Data yang digunakan untuk menghitung ESA hanya dari kendaraan niaga dengan 6 roda atau lebih.

3.2 Hubungan regangan - repetisi dan umur perkerasan

Untuk menentukan umur perkerasan – ditentukan berdasarkan nilai repetisi paling menentukan dari kriteria retak kelelahan pada campuran beraspal, retak kelelahan pada cemented materials, serta kriteria deformasi permanen pada tapak roda. Oleh karena itu pada MDP terdapat hubungan regangan tarik pada lapis campuran beraspal dengan repetisi akibat beban yang menyebabkan regangan dan mengakibatkan kerusakan retak kelelahan pada permukaan perkerasan seperti **Persamaan 2**. Apabila pada struktur perkerasan lentur terdapat lapis cemented materials, maka regangan tarik pada cemented materials (dengan modulus bahan antara 2,000-10,000 MPa) dengan repetisi sumbu standar pada MDP seperti **Persamaan 3**. Selain itu juga pada MDP terdapat hubungan regangan tekan di permukaan lapis tanah dasar dengan repetisi akibat beban yang menyebabkan regangan sehingga terjadi kerusakan berupa deformasi permanen pada tapak roda seperti **Persamaan 4**. Ke tiga hubungan regangan dan jumlah pengulangan beban di atas adalah hubungan yang dipakai oleh Austroads (Austroads, 2012).

Untuk menggunakan **Persamaan 2** diperlukan informasi campuran seperti V_b dan S_{mix} . Apabila tidak diketahui kedua parameter tersebut pada campuran yang dipakai, maka dapat digunakan informasi yang terdapat pada **Tabel 3**. Modulus campuran beraspal pada tabel ini hanya berlaku untuk lokasi dengan WMAPT 41°C. Jika pada lokasi desain mempunyai WMAPT yang berbeda, maka modulus campuran beraspal perlu dikoreksi dengan faktor seperti **Tabel 4**. **Persamaan 2** dan **Persamaan 3** dianggap memiliki tingkat keandalan proyek sebesar 95%. Jika diinginkan desain dengan tingkat keandalan yang berbeda, maka digunakan faktor RF yang ditentukan menurut **Tabel 5**. Khusus untuk kriteria deformasi permanen dengan **Persamaan 4**, tidak ada faktor RF, sehingga tingkat keandalan proyek tidak bisa diubah.

$$N = RF \left[\frac{6918(0.856V_b + 1.08)}{S_{mix}^{0.36}(\mu\epsilon)} \right]^5 \quad (2)$$

$$N = RF \left[\frac{\left(\frac{113000}{E^{0.804}} + 191 \right)}{\mu\epsilon} \right]^{12} \quad (3)$$

$$N = \left[\frac{9300}{\mu\epsilon} \right]^7 \quad (4)$$

Tabel 2. Konversi ESA4 menjadi ESA5 dengan traffic multiplier

Jenis Kendaraan			ESA4	ESA5	Traffic Multiplier (TM)
Kode	Deskripsi	Notasi			
7A1	Truk 3 sumbu - ringan	1.22	10.1	18.4	1.82
7A2	Truk 3 sumbu - sedang	1.22	10.5	20.0	1.90
7C1	Truk 4 sumbu - trailer	1.2-22	15.9	29.5	1.86
7C2A ^{*)}	Truk 5 sumbu tandem	1.22-22	19.8	39.0	1.97

^{*)} Notasi tidak terdapat pada MDP

Sumber: Zamhari, James, & Jameson (2017)

3.3 Modulus lapis batu pecah

Modulus lapis pondasi batu pecah mempunyai modulus yang tergantung pada state of the stress di lokasi tersebut. Austroads dan MDP menetapkan modulus lapis pondasi batu pecah di bagian atas - tepat di bawah lapis campuran beraspal sebagai nilai minimum antara modulus yang tercantum pada **Tabel 6** dan **Persamaan 5**. Satuan dari tebal lapis pondasi pada **Persamaan 5** adalah mm.

Lapis pondasi batu pecah dibagi menjadi beberapa sub lapis, sehingga $R \leq 2$. R dihitung dengan **Persamaan 6**. Pedoman penentuan jumlah sub lapis juga dapat dilihat

Tabel 3. Campuran beraspal menurut MDP

Jenis Campuran Beraspal	V_b (%)	S_{mix} (MPa) pada WMAPT 41°C
HRS WC	16.4	800
HRS BC	14.8	900
AC WC	12.2	1100
AC BC	15.5	1200
AC Base atau AC BC sebagai lapis pondasi	15.5	1600

Diolah dari Zamhari, James, & Jameson (2017)

Tabel 4. Faktor koreksi modulus campuran beraspal akibat temperatur campuran

WMAPT (°C)	Faktor Koreksi Modulus Campuran Beraspal
42	0.923
41	1.000
40	1.083
39	1.174
38	1.271

Sumber: Zamhari, James, & Jameson (2017)

Tabel 5. Faktor tingkat keandalan proyek akibat kerusakan retak kelelahan

Reliability (%)	Reliability Factor, RF	
	Campuran Beraspal	Cemented Material
97.5	0.67	0.5
95	1.0	1.0
90	1.5	2.0
85	2.0	3.3
80	2.5	4.7

Sumber: Zamhari, James, & Jameson (2017) dan Austroads (2012)

pada **Tabel 7**. Setelah jumlah sub lapis ditentukan, maka modulus setiap sub lapis dihitung mulai dari sub lapis di atas subgrade dikali faktor R.

$$E_{top\ of\ base} = E_{subgrade} (2)^{(base\ thickness / 125)} \quad (5)$$

$$R = \left(\frac{E_{top\ of\ base}}{E_{subgrade}} \right)^{1/n} \quad (6)$$

3.4 Modulus resilien lapis tanah dasar

Modulus resilien lapis tanah dasar (subgrade) diprediksi berdasarkan nilai CBR lapis tanah dasar, seperti **Persamaan 3.7** (untuk E_{sg} dalam MPa) atau **Persamaan 3.8** (untuk E_{sg} dalam psi). Penggunaan kedua persamaan itu dibatasi untuk nilai E_{sg} 150 MPa.

$$E_{sg} = 10(CBR) \quad (7)$$

$$E_{sg} = 1500(CBR) \quad (8)$$

3.5 Modulus resilien lapis campuran beraspal

Besarnya modulus campuran beraspal pada lapis permukaan perlu diketahui untuk perhitungan regangan yang terjadi akibat beban. Metode Austroads menggunakan pendekatan yang digunakan metode Shell (1978), berdasarkan prediksi modulus aspal yang kemudian dipakai untuk memprediksi modulus campuran. Prediksi tersebut menggunakan nomogram, yang akurasi pembacaannya tidak tentu. Selain itu nomogram dibuat berdasarkan aspal minyak biasa – tanpa bahan additives seperti PMB (Polymer Modified Binder) maupun yang multigrade.

Untuk campuran beraspal yang menggunakan aspal dengan modifier, koreksi prediksi modulus

berdasarkan nomogram Shell harus dilakukan dengan menggunakan faktor pada **Tabel 8**. Nilai tipikal beton aspal di Australia adalah seperti **Tabel 9**. Untuk memahami jenis bitumen yang digunakan, perlu mengacu pada informasi pada **Tabel 10** – sebagai spesifikasi bitumen di Australia.

Modulus campuran beraspal juga bisa diprediksi dengan **Persamaan 9** seperti yang dipakai pada Asphalt Institute (1982). Selain itu ada ketentuan tentang tebal minimum lapis yang terkait dengan ukuran nominal maksimum agregat, seperti pada **Tabel 11**.

$$\log|E_{ac}| = 5.553833 + 0.028829 \left(\frac{P_{200}}{f^{0.17033}} \right) - 0.03476(V_p) + 0.070377(\eta) + 0.000005 \left[t_p^{(1.3+0.49825(\log(f)))} P_{ac}^{0.5} \right] - 0.00189 \left[t_p^{(1.3+0.49825(\log(f)))} \frac{P_{ac}^{0.5}}{f^{1.1}} \right] + 0.931757 \left(\frac{1}{f^{0.02774}} \right) \quad (9)$$

$$\eta = 29,508.2(Pen^{-2.1939}) \quad (10)$$

$$P_{ac} = 0.483(V_{be}) \quad (11)$$

$$P_{ac} = 0.484(V_b) \quad (12)$$

3.6 Jarak antar roda dan antar sumbu

Informasi jarak roda dan jarak antar sumbu diperlukan untuk analisis regangan akibat suatu beban sumbu. Untuk sumbu tunggal roda ganda Austroads menetapkan dimensinya seperti pada **Gambar 1**. Austroads tidak memberi informasi tentang jarak antara sumbu (baik tandem, triple, maupun kuartet). Dari berbagai literatur seperti antara lain VSS (2015), MN DoT (2016), FHWA (2015), beban batas dan jarak antar sumbu bervariasi. Jarak sumbu berkisar antara 33 - 48 in. Beban maksimum untuk sumbu kemudi: sumbu tunggal 12.5 – 20 kips, dan sumbu tandem 24 kips. Beban maksimum untuk sumbu lain: sumbu tunggal 20 kips, tandem 34 – 38 kips dan triple axle 42 – 60 kips. Batasan berat total maksimum kendaraan: 2-sumbu 40 kips, 3-sumbu 54 kips, 4-sumbu 74 kips, dan 5-sumbu 80 kips. Dalam penelitian ini diambil jarak antar sumbu 1200 mm (=48 in) mengingat ukuran diameter ban truk tidak lebih besar daripada 1150 mm.

Tabel 7. Jumlah sub lapis dari lapis pondasi batu pecah

Thickness of Granular Material (mm)	$E_{top}/E_{subgrade}$				
	<2	2-3.9	4-7.9	8-15.9	16-30
100-150	1	2	3	-	-
151-300	2	2	3	4	-
301-450	3	3	3	4	5
451-600	4	4	4	4	5
601-750	5	5	5	5	5
751-900	6	6	6	6	6
901-1050	7	7	7	7	7

Sumber: Austroads (1992)

Tabel 6. Modulus bagian atas dari pondasi batu pecah (MPa)

Tebal Lapis di atas Lapis Batu Pecah (mm)	Modulus Material Berbutir (MPa)							
	DI bawah HRS ¹⁾	Di bawah AC WC/BC/ Base ²⁾	Modulus di atas Lapis Batu Pecah ³⁾					
			1000 (MPa)	2000 (MPa)	3000 (MPa)	4000 (MPa)	5000 (MPa)	
40	350	350	350	350	350	350	350	350
75	350	350	350	350	350	340	320	310
100	350	350	350	350	310	290	270	250
125	320	300	320	270	240	220	200	
150	280	250	280	230	190	160	150	150
175	250	250	250	190	150	150	150	150
200	220	210	220	150	150	150	150	150
225	180	150	180	150	150	150	150	150
≥250	150	150	150	150	150	150	150	150

Sumber: ¹⁾ Zamhari, James, & Jameson (2017), ²⁾ Austroads (2012)

Tabel 8. Faktor koreksi modulus campuran beraspal (berdasarkan nomogram Shell) - untuk campuran dengan modifier.

Pre-1990 Description of Binder Type	Austrroads Binder Grade	Modulus Adjustment Factor
Styrene-butadiene-styrene (SBS) 6%	A10E	0.70
Styrene-butadiene-styrene (SBS) 5%	A15E	0.75
25 parts granulated crumb rubber	A40R	0.75
Styrene-butadiene-styrene (SBS) 3%	A20E	0.80
Polybutadiene (PBD)	A25E	0.90
Multigrade	Multigrade 1000/320	1.00
Ethylene vinyl acetate (EVA)	A35P	1.25

Sumber: Austrroads (2012)

Tabel 9. Nilai tipikal modulus beton aspal (MPa) di Australia berdasarkan hasil uji laboratorium indirect tensile pada temperatur 25°C, rongga udara 5%, dan rise time 40 ms

Binder	Maximum Particle Size (mm)					
	10		14		20	
	Range	Typical	Range	Typical	Range	Typical
Class 170	2000 - 6000	3500	2500 - 4000	3700	2000 - 4500	4000
Class 320	3000 - 6000	4500	2000 - 7000	5000	3000 - 7500	5500
Class 600	3000 - 6000	6000	4000 - 9000	6500	4000 - 9500	6500
Multigrade	3300 - 5000	4500	3000 - 7000	5000	4000 - 7000	5500
A10E	1500 - 4000	2200	2000 - 4500	2500	3000 - 7000	3000

Sumber: Austrroads (2012)

Tabel 10. Spesifikasi aspal di Australia

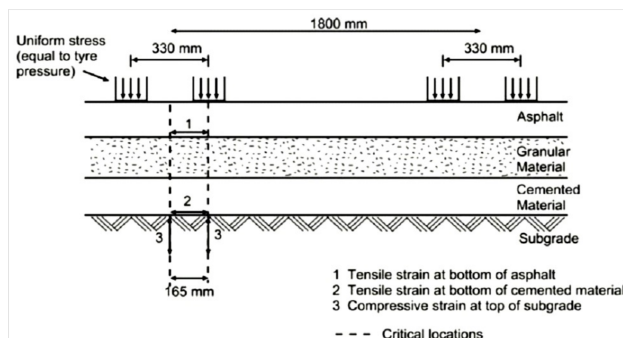
Test	Bitumen Class			PMB (Polymer Modified Binder) Grade				
	170	320	600	A10E	A15E	A20E	A25E	A35P
Visc (elastomer) Pa.s @ 60 deg C, min	140	260	600	12000	8000	2200	600	2000
Stiffness (elastomer) @ 25 deg. C (kPa), min				30	30	35	45	100
Torsional recovery % @ 25 deg. C, min				60	58	38	17	8
Viscosity @ 165 deg. C, (Pa.s), max				11	0.9	0.6	0.6	1.5
Viscosity @ 135 deg. C, (Pa.s), max	0.45	0.65	0.85					
Softening point (R&B) deg. C, min.	43	46	50	88	82	65	52	60
Penetration (100g, 5s) dmm @ 25 deg. C, min	62	40	20					

Sumber: Austrroads (2007)

Tabel 11. Ukuran nominal maximum agregat dan tebal minimum lapis campuran beraspal

Ukuran Nominal Maximum Agregat (mm)	Tebal Minimum Campuran Beraspal (mm)
7	20 – 30
10	25 – 40
14	35 – 55
20	50 – 80
28	70 – 100

Sumber: Austrroads (2012)

**Gambar 1. Model sumbu tunggal roda ganda (Jameson, 2003)**

Jarak antar roda pada suatu sumbu diambil seperti pada Austrroads, yaitu 330 mm.

Untuk desain tebal perkerasan, Austrroads (2012) menetapkan tekanan pada bidang kontak sebesar 750 kPa, berdasarkan penelitian terakhir bahwa tekanan pada bidang kontak yang terjadi pada kendaraan berkisar antara 500 – 1000 kPa.

4. Model Perkerasan

Analisis yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian ini adalah:

- Menghitung lendutan pada permukaan perkerasan akibat beban dan jenis sumbu sebagai berikut: sumbu tunggal roda tunggal 5.4 t (53 kN), sumbu tunggal roda ganda 8.16 t (80 kN), sumbu tandem 13.76 t (135 kN), dan sumbu triple 17.45 t (181 kN). Perhitungan lendutan pada berbagai tebal struktur perkerasan lentur dan modulus resilien tanah dasar. (sehingga bisa menjawab apakah beban dan sumbu tersebut memang menghasilkan lendutan yang sama - seperti yang dinyatakan oleh Austrroads).

- b. Menghitung regangan tarik dan regangan tekan pada posisi kritis untuk dianalisis umur fatigue dan deformasi akibat setiap kombinasi beban dan sumbu tersebut. (sehingga bisa menjawab apakah beban dan sumbu tersebut memang menghasilkan dampak kerusakan yang sama – seperti yang dinyatakan oleh Austroads).
- c. Kedua perhitungan dilakukan dengan Program KenPave.
- d. Lapis permukaan campuran beraspal dengan tebal antara 50 – 150 mm (50, 100, 150mm), dan angka Poisson 0.35
- e. Lapis pondasi batu pecah dengan tebal antara 200 – 500 mm (200, 350, 500mm), dan angka Poisson 0.35
- f. Lapis tanah dasar mempunyai nilai modulus antara 25 – 150 MPa (25, 50, 75, 100, 150MPa), dan angka Poisson 0.45
- g. Modulus campuran beraspal dihitung berdasarkan prediksi MDP yaitu 800, 900, 1100, 1200 MPa.
- h. Modulus lapis pondasi dihitung seperti metode Austroads
- i. Tekanan pada bidang kontak antara ban dan permukaan perkerasan 750 MPa
- j. Jarak antar sumbu 1200 mm
- k. Jarak roda ganda 330 mm

5. Hasil Perhitungan

5.1 Modulus campuran beraspal

Berdasarkan karakteristik campuran beraspal yang ditetapkan dalam MDP, maka telah dihitung modulus campuran beraspal dengan menggunakan **Persamaan 9** – yang hasilnya disajikan pada **Tabel 12**. Selain itu juga disajikan modulus campuran beraspal menurut MDP pada berbagai temperatur pada **Tabel 13**. Secara visual perbandingan nilai modulus elastisitas campuran beraspal dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 3** – dimana untuk semua kasus modulus campuran beraspal menurut MDP lebih besar daripada modulus menurut Asphalt Institute. Lalu pada **Gambar 4** diperlihatkan pula rasio modulus pada berbagai nilai WMAPT terhadap temperatur standar 41°C.

5.2 Standard load group

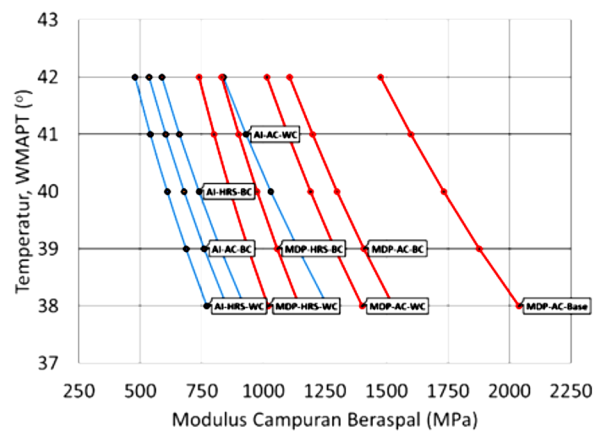
Analisis regangan tarik di bagian bawah lapis campuran beraspal maupun regangan tekan di atas lapis tanah dasar dihitung dengan Program KenPave. Lapis pondasi pada struktur perkerasan dibagi menjadi sub lapis. Pembagian lapis pondasi menjadi beberapa lapis seperti yang disyaratkan oleh Austroads seperti **Persamaan 6** mengakibatkan variasi jumlah sub lapis pada struktur yang mempunyai tebal lapis pondasi yang sama besar. Dampak dari hal ini pada hasil evaluasi regangan tarik maupun tekan pada tebal struktur yang sama namun modulus resilien lapis tanah dasar berubah menjadi bermasalah (nilainya naik turun tidak beraturan). Untuk mengatai masalah ini jumlah sub lapis diambil sama untuk semua struktur dan memperhatikan pemenuhan ketentuan R tidak lebih besar dari 2.

Tabel 12. Modulus campuran beraspal yang dihitung dengan persamaan 3.9.

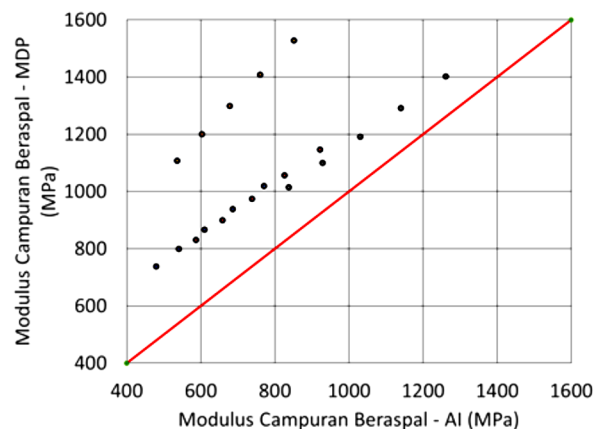
WMAPT (°C)	HRS-WC	HRS-BC	AC-WC	AC-BC	AC base
42	479	587	837	536	536
41	541	659	930	604	604
40	610	738	1,031	678	678
39	686	826	1,141	760	760
38	771	922	1,262	852	852

Tabel 13. Modulus campuran beraspal menurut MDP

WMAPT (°C)	HRS-WC	HRS-BC	AC-WC	AC-BC	AC base
42	738	831	1,015	1,108	1,477
41	800	900	1,100	1,200	1,600
40	866	975	1,191	1,300	1,733
39	939	1,057	1,291	1,409	1,878
38	1,019	1,147	1,401	1,529	2,038

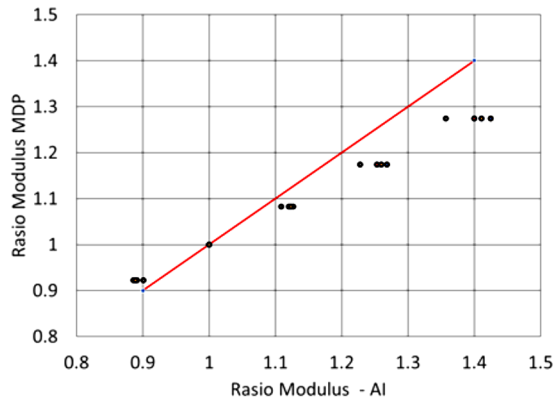


Gambar 2. Modulus campuran beraspal menurut MDP dan AI untuk setiap jenis campuran

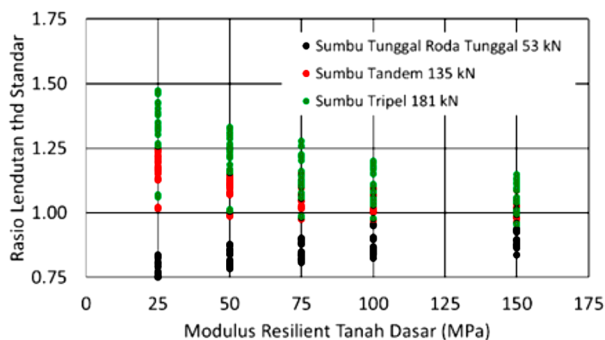


Gambar 3. Modulus campuran beraspal menurut MDP dan AI

Ada 160 kombinasi struktur perkerasan yang dihitung lendutan, regangan tarik dan regangan tekan akibat beban sumbu tidak standar maupun beban sumbu standar. Hasil analisis tersebut disajikan secara visual seperti pada **Gambar 5** sebagai perbandingan lendutan



Gambar 4. Rasio modulus campuran beraspal menurut MDP dan AI



Gambar 5. Rasio lentutan antara beban tidak standar dengan beban standar

akibat beban tidak standar terhadap lendutan akibat beban standar dan Gambar 6 sebagai nilai Angka Ekuivalen dari beban sumbu tidak standar yang dianalisis (sumbu tunggal roda tunggal 53 kN, sumbu tandem 135 kN, dan sumbu tripel 181 kN).

6. Analisis

6.1 Modulus campuran beraspal

Modulus campuran beraspal MDP lebih besar daripada yang diprediksi dengan Persamaan Asphalt. Modulus MDP berkisar antara 1.11 sampai dengan 2.75 kali nilai modulus AI (Asphalt Institute). Sehingga pada Gambar 2, semua kurva modulus MDP berada di sebelah kanan dari modulus Asphalt Institute, dan pada Gambar 3, semua titik modulus campuran beraspal berada di atas garis equality, yang berarti semua modulus MDP lebih besar daripada modulus AI. Modulus MDP pada 41°C akan sama dengan yang diprediksi AI apabila HRS-WC dianalisis pada WMAPT 37.7°C, HRS-BC pada 38.2°C, AC-WC pada 39.4°C, AC-BC pada 34.9°C, dan AC Base pada 32.1°C.

Perubahan modulus dari temperatur standar 41°C menjadi temperatur berbeda juga tidak sama antara AI dan MDP – lihat pada Gambar 4. Rasio modulus (=perbandingan modulus pada temperatur standar terhadap modulus pada temperatur tidak standar) atau faktor pengali (koefisien) untuk mendapatkan modulus pada temperatur yang lebih rendah daripada standar –

lebih kecil daripada MDP dibandingkan dengan AI. Hal yang sebaliknya terjadi pada temperatur yang lebih tinggi daripada temperatur standar. Perubahan modulus akibat temperatur menurut MDP tidak sesensitif AI.

Apabila persamaan AI lebih tepat untuk memprediksi modulus campuran, maka asumsi modulus campuran pada WMAPT = 41°C pada MDP kurang tepat untuk digunakan dan nilainya terlalu besar. Faktor konversi untuk mendapatkan modulus campuran beraspal pada temperatur tidak standar juga tidak tepat dan sebaiknya tidak digunakan.

6.2 Standard load group

Austrroads menentukan ekuivalen kerusakan akibat sumbu yang berbeda daripada sumbu standar ditetapkan berdasarkan kesamaan lendutan. Lendutan sumbu tunggal roda tunggal 53 kN dianggap sama dengan sumbu standar (sumbu tunggal roda ganda) 80 kN. Hal serupa untuk sumbu tandem adalah 135 kN, dan 181 kN untuk sumbu tripel. Berdasarkan hasil perhitungan lendutan pada berbagai tebal struktur perkerasan (120 variasi) dan modulus resiliensi lapis tanah dasar (4 variasi), lalu dihitung rasio lendutannya (yaitu perbandingan lendutan maksimum akibat beban tidak standar terhadap lendutan maksimum akibat beban standar pada struktur perkerasan yang sama). Tampak bahwa rasio lendutan tersebut pada Gambar 5 yang mempunyai nilai berkisar antara 1.47 sd 0.75.

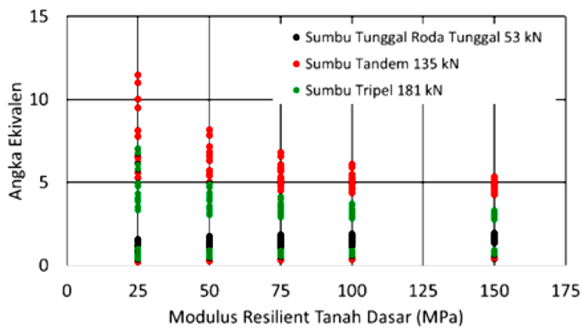
Jika standard load group ditentukan berdasarkan kesamaan lendutannya, maka semua rasio di atas seharusnya bernilai 1.0. Hal ini berarti beban yang ditentukan pada Austrroads tersebut tidak berlaku umum untuk semua kondisi struktur perkerasan.

Analisis dilanjutkan dengan mencari rasio umur perkerasan yaitu perbandingan umur perkerasan akibat beban standar terhadap umur perkerasan akibat beban sumbu tidak standar (dari masing-masing load group). Sebenarnya rasio tersebut merupakan angka ekuivalen dari beban tidak standar. Jika standard load group tersebut mempunyai dampak merusak yang sama seperti sumbu standar, maka angka ekuivalen dari semua standard load group tersebut adalah 1.0. Berdasarkan hasil analisis diperoleh hasil seperti pada Gambar 6. Pada gambar tersebut tampak bahwa angka ekuivalen tersebut nilai yang berubah-ubah (tergantung tebal struktur dan modulus lapis perkerasan) dan nilainya berkisar antara 0.21 sd 11.48. Rasio itu pada perkerasan yang tipis (lapis permukaan 50 mm) berkisar antara 0.21 sd 1.04, sedangkan pada perkerasan yang tebal (150 mm) berkisar antara 0.56 sd 11.48.

Ini berarti standard load group tersebut tidak mempunyai dampak kerusakan yang sama seperti yang diinginkan – sehingga tidak disarankan untuk digunakan dalam proses konversi beban sumbu menjadi beban sumbu standar.

6.3. ESA, ESA5 (SAR5), SAR7, dan SAR12

Berdasarkan ketentuan MDP yang telah dibahas pada Bab 3, maka penggunaan ESA4 (atau ESA) dan ESA5



Gambar 6. Angka ekuivalen beban tidak standar

(atau SAR5) tidak sama dengan Austroads (yang sesungguhnya menjadi acuan MDP). Menurut Austroads untuk mendesain perkerasan bukan hanya diperlukan ESA dan SAR5, tetapi juga SAR12 dan SAR7 – hal ini disebabkan oleh perbedaan metode desain dan tergantung dari jenis kerusakan yang dianalisis. ESA dipakai kalau desain perkerasan secara empiris dan struktur perkerasan yang tipis.

Metode desain mekanistik empiris mengharuskan penggunaan SAR5 untuk analisis jenis kerusakan retak leleh pada lapis campuran beraspal, SAR12 untuk analisis retak leleh pada lapis pondasi berbahan pengikat portland cement, serta SAR7 untuk analisis deformasi permanen pada lapis tanah dasar. Perlu dicatat bahwa pada MDP, ESA5 ini juga digunakan pada struktur perkerasan yang lapis pondasinya berpengikat portland cement (cemented materials).

Ketika mendesain tebal struktur perkerasan dengan metode mekanistik empiris, kombinasi berat dan jenis sumbu dihitung menjadi ESA, SAR5, SAR12 (jika lapis pondasi berbahan pengikat portland cement), dan SAR7. Untuk memudahkan pendesain cukup menghitung ESA, untuk mendapatkan SARm tidak perlu mengulang semua perhitungan sebelumnya. Austroads memberikan faktor konversi dari ESA menjadi SARm untuk beberapa daerah di Australia – seperti pada Tabel D.1 pada Austroads (2012). Perlu ditegaskan bahwa besaran konversi ini tergantung kepada komposisi berat dan jenis sumbu pada lokasi jalan tersebut.

Dalam MDP, untuk mengkonversi jumlah ESA4 menjadi ESA5 digunakan Traffic Multiplier (TM), sehingga $ESA5 = (TM) \times ESA4$. TM tersebut dicantumkan pada Tabel 3.2. Nilai TM akibat kriteria kelelahan lapisan beraspal untuk kondisi lalu lintas di Indonesia adalah berkisar di antara 1.8 - 2.0. Berbeda dengan Austroads yang memperhitungkan seluruh komposisi lalu lintas, MDP memperhitungkan angka konversi (TM) itu untuk jenis kendaraan tertentu. Selain itu MDP menyatakan: “Traffic multiplier (TM) digunakan untuk mengoreksi ESA4 menjadi ESA5 akibat kelelahan pada lapisan beraspal, yang disebabkan oleh beban berlebih (overloading) yang signifikan.” Padahal sesungguhnya (menurut Austroads) penggunaan SAR5 disebabkan metode desain dan jenis kerusakan yang terjadi – tidak ada hubungannya dengan “beban berlebih yang

signifikan.” Selain itu dalam MDP, konversi komposisi beban lalu lintas menjadi ESA7 dan ESA12 tidak pernah dibahas, padahal nilai tersebut diperlukan untuk proses analisis desain.

Perlu juga diperhatikan bahwa pada Austroads (2008) tidak dikenal adanya istilah Traffic Multiplier. Pada Austroads (2001) yang merupakan draft naskah revisi terhadap Austroads (1992) terdapat istilah Reliability Traffic Multiplier, namun rupanya istilah tersebut tidak jadi dipakai pada versi akhirnya. Pemahaman Reliability Traffic Multiplier ini terkait dengan desain yang memperhatikan tingkat keandalan proyek tersebut. Pada Austroads (2008), untuk maksud itu akhirnya digunakan RF atau project reliability.

7. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisis di atas, maka dapat disimpulkan:

1. Modulus campuran beraspal yang dicantumkan pada MDP (pada temperatur standar – WMAPT 41°C) lebih besar 1.11 sampai dengan 2.75 kali nilai modulus yang diprediksi dengan AI (Asphalt Institute).
2. Modulus MDP (pada temperatur standar WMAPT 41°C) akan sama besar dengan AI, apabila dianalisis pada temperatur (WMAPT) berikut: HRS -WC – 37.7°C, HRS-BC – 38.2°C, AC-WC – 39.4°C, AC-BC – 34.9°C, dan AC Base – 32.1°C.
3. Untuk mendapatkan modulus pada temperatur tidak standar digunakan faktor pengali (koefisien) terhadap modulus standar. Besar faktor pengali yang ditetapkan sebagai suatu konstanta pada MDP – menurut analisis ini ternyata tidak konstan.
4. Untuk temperatur di bawah temperatur standar, faktor pengali (koefisien) pada MDP lebih kecil daripada yang seharusnya. Hasil yang sebaliknya untuk temperatur di atas temperatur standar. Hal ini berarti perubahan modulus campuran akibat temperatur pada MDP tidak sesensitif Asphalt Institute.
5. Modulus campuran beraspal, maupun faktor pengali (koefisien) untuk mendapatkan modulus campuran pada WMAPT yang berbeda dari temperatur standar (41°C) pada MDP tidak disarankan untuk digunakan dalam desain.
6. Penetapan Standar Load Group 53 kN (sumbu tunggal roda tunggal), 135 kN (sumbu tandem) dan 181 kN (tripel) diklaim sebagai beban yang memberikan lendutan maksimum yang sama dengan akibat beban standar. Analisis ini tidak mengkonfirmasi hal tersebut.
7. Penetapan Standar Load Group 53 kN (sumbu tunggal roda tunggal), 135 kN (sumbu tandem) dan 181 kN (tripel) tidak memberikan dampak kerusakan yang sama seperti akibat sumbu standar. Secara keseluruhan (yang dianalisis) – angka ekuivalen standard load group berada antara nilai 0.21 sd 11.48.
8. Penetapan Standard Load Group seperti pada MDP maupun Austroads tidak disarankan untuk digunakan dalam proses konversi beban menjadi sumbu standar.

9. Penggunaan ESA4 dan ESA5 dalam MDP berbeda dengan maksud tujuan penggunaannya pada Austroads, sehingga SAR7 maupun SAR12 tidak dikenal.
10. Konversi ESA4 menjadi ESA5 telah keliru diaplikasikan dalam MDP – sesungguhnya suatu faktor konversi yang tidak konstan (tergantung pada komposisi kendaraan) menjadi suatu faktor yang konstan (untuk kendaraan tertentu).
11. Penggunaan nilai modulus campuran beraspal, standard load group, dan penggunaan ESA4 dan ESA5 dalam MDP perlu ditelaah kembali.

Daftar Notasi

- SAR_{m_j} = Standard Axle Repetition, yaitu pengulangan beban j pada sumbu i untuk jenis kerusakan yang sesuai dengan konstanta m
- SL_i = Standard Load group I, yaitu beban standar sesuai dengan grup sumbu i, misalnya tunggal roda tunggal, sumbu tunggal roda ganda, sumbu tandem, sumbu tripel
- L_{ij} = Beban j pada grup sumbu i
- m = konstanta yang digunakan, sesuai dengan jenis kerusakan
- VDF = Vehicle Damage Factor
- V_b = Persen volume bitumen (aspal) terhadap volume total campuran
- S_{mix} = Modulus campuran beraspal (MPa)
- E = Modulus campuran beraspal (MPa)
- RF = Reliability Factor untuk hubungan retak kelelahan campuran beraspal dan pengulangan beban, 80% - 2.5, 85% - 2.0, 90% - 1.5, 95% - 1.0, 97.5% - 0.67
- WMAPT = Weighted Mean Asphalt Pavement Temperature

Daftar Pustaka

- AASHTO. (1972). *AASHTO Interim Guide for the Design of Pavements*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (1986). *AASHTO Guide for the Design of Pavements*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for the Design of Pavements*. Washington, DC: American Association of States Highway and Transportation Officials.
- Ahlborn, G. (1972). *ELSYM5, Computer Program for Determining Stresses and Deformations in Five Layer Elastic Systems*. Berkeley, CA: University of California.
- Allen, J. J. (1973). *The Effects of Non-constant Lateral Pressures on the Resilient Response of Granular Materials*. Urbana-Champaign: Univeristy of Illinois.

- Anderson, D. (1982). *Study of Asphalt Fatigue Relationship*. Sydney: Report to WG.
- Andrei, D., Witzczak, M. W., & Mirza, M. W. (1999). *Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures, Inter Team Technical Report prepared for the NCHRP 1-37A Project*. College Park, MD.: Department of Civil Engineering, University of Maryland.
- Asphalt Institute. (1982). *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), 9th edition, Research Report 82-2*. College Park, MD: Asphalt Institute.
- Asphalt Institute. (1991). *Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets- Manual Series No 1 (MS-1)*. Lexington, KY: Asphalt Institute.
- Austroads. (1992). *Pavement Design - A Guide to the Structural Design of Road Pavements*. Sydney: Austroads, Inc.
- Austroads. (2001). *2001 Austroads Pavement Design Guide (Final Draft) - AP-T10/01*. Sydney: Austroads.
- Austroads. (2004). *Pavement Design – A Guide to the Structural Design of Road Pavements. Pub. No. AP-G17/04*. Sydney: Austroads.
- Austroads. (2004). *Technical Basis of Austroads Pavement Design Guide*. Sydney: Austroads.
- Austroads. (2007). *Guide to Pavement Technology, Part 4B: Asphalt - AGPT04B/07*. Sydney: Austroads.
- Austroads. (2008). *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*. Sydney: Austroads.
- Austroads. (2008). *Pavement Dsign - A Guide to the Structural Design of Pavements*. Sydney, NSW, Australia: Austroads, Ltd.
- Austroads. (2012). *Guide to Pavement Technology - Part 2: Pavement Structural Design*. Sydney, NSW, Australia: Austroads Ltd.
- Bonnaure, F., Gest, G., Gervois, A., & Uge, P. (1977). *A New Method of Predictiong the Stiffnes of Asphalt Paving Mixtures*. San Antonio, TX: Association of Asphalt Paving Technologist.
- Boyce, J. R., Brown, S. F., & Pell, P. S. (1976). *The Resilient Behavior of a Granular material Under Repeated Loading*. Australian Road Research Board.
- Brown, S. (1973). *Determination of Young's Modulus for Bituminous Materials in Pavement Design*. Washington, DC: Transportation. Research. Record.
- FHWA. (2015). *Compilation of Existing State Truck Size and Weight Limit Laws - Report to*

- Congress. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Finn, F. N., Saraf, C., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., & Abdullah, A. (1977). The Use of Distress Prediction Subsystems for the Design of Pavement Structures. Ann Arbor, MI: Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.
- Gribble, M., & Patrick, J. (2008). *Adaptation of the Austroads Pavement Design Guide for New Zealand Conditions - Research Report 305*. Wellington, New Zealand: Land Transport New Zealand.
- Heukelom, W., & Klomp, A. (1962). Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During. Ann Arbor, MI: Proceedings of International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.
- Hicks, R. G. (1970). *Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials*. Berkeley, CA: University of California.
- Hicks, R. G., & Finn, F. N. (1970). Analysis of Results from the Dynamic Measurements Program on the San Diego Test Road. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 39, 153-185.
- HRB. (1961). *The AASHTO Road Test, History and Description of Project - Special Report 61A*. Washington, DC: Highway Research Board, National Research Council.
- HRB. (1962). *The AASHTO Road Test, Special Studies - Special Report 61F*. Washington, DC: Highway Research Board, National Research Council.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design, 2nd Ed.* Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc.
- James, E., & Jameson, G. (2013). *Manual Desain Perkerasan Jalan - No 02/M/BM/2013*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Jameson, G. (1996). *Origins of Austroads Design Procedures for Granular Pavements - Research Report ARR No. 292*. Sydney: ARRB Transport Research.
- Jameson, G. (2003). *Technical Basis of Austroads Pavement Design Guide Part 3 - 2004 Guide procedures for the design of flexible pavements*. Sydney: Austroads.
- Kalcheff, I. V., & Hicks, R. G. (1973). A Test Procedure for Determining the Resilient Properties of Granular Materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 1(6).
- Kim, Y. R., Underwood, B., Sakhaei Far, M., Jackson, N., & Puccinelli, J. (2011). *LTPP Computed: Parameter Dynamic Modulus, FHWA-HRT-10-035*. McLean, VA: Turner-Fairbank Highway Research Center, FHWA.
- Kopperman, S., Tiller, G., & Tseng, M. (1986). *ELSYM5, Interactive Microcomputer Version, - User's Manual, Report No. FHWA-TS-87-206*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Maher, A., & Bennet, T. (2008). *Evaluation of Poisson's Ratio for Use in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), FHWA-NJ-2008-004*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- MN DoT. (2016). *Minimum Spacing Between Axles within Groups & Between Two Similar Groups*. Office of Freight & Commercial Vehicle Operations, MN DoT.
- Moffatt, M., & Jameson, G. (1998). *Granular Materials Moduli Under Asphalt and Cemented Materials - WD-R98/008*. Sydney: ARRB.
- Monismith, C. L., Epps, J. A., Kasiachuck, D. A., & McLean, D. B. (1972). *Asphalt Mixtures Behavior in Repeated Flexure, Report TE 70-5*. Berkeley, CA: University of California.
- NAASRA. (1979). *Interim Guide to Pavement Thickness Design*. Sydney: National Association of Australian State Road Authorities.
- NCHRP. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A*. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.
- No 12-SE-M-2013. (2013). *Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Pd T-01-2002-B. (1992). *Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Permukiman dan Prasarana Wilayah, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- Pd T05-2005-B. (2005). *Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan*. Jakarta: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- Potter, D. (1999). *Technical Basis of Austroads Pavement Design Guide Part 1: 1992 Guide Procedures for Design of Flexible Pavements*. Sydney: Austroads.
- Potter, D. W., & Donald, G. S. (1984). Revision of NAASRA Interim Guide to Pavement

- Thickness Design. Hobart, Tasmania: Proceedings on 12th ARRB Conference, University of Tasmania.
- Rada, G., & Witzak, M. W. (1981). Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Materials. *Transportation Research Record 810*, 23-33.
- Scala, A. (1970). Comparison of the Response of Pavements to Single and Tandem Axle Loads. *Proceedings on 5th ARRB Conference* (hal. 231-252). Australian Road Research Board.
- Shell. (1978). *Shell Pavement Design Manual - asphalt pavements and overlays for road traffic*. London: Shell International Petroleum Company.
- SNI 03-1732. (1989). *Petunjuk Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan Metode Analisa Komponen*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Stevenson, J. (1976). *Economics of Road Vehicle Limits (ERVL) Study - Report T4*. NAASRA.
- Sun, L. (2016). *Structural Behavior of Asphalt Pavements*. Cambridge, MA: Elsevier.
- Tjan, A., & Al-Ghifari, H. (2017). Temperatur Rata-rata Tertimbang untuk Desain Perkerasan Lentur. *Jurnal Teknik Sipil - ITB (dalam proses), dalam proses*.
- van der Poel, C. (1954). A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data. *Journal of Applied Chemistry*, 4(3), 1-17.
- VSS. (2015). *Guidelines on Maximum Weights and Dimensions of Mechanically Propelled Vehicles and Trailers, Including Manoeuvrability Criteria*. Ballina, Ireland: Vehicle Standards Section, Road Safety Authority,.
- Witzak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., & Von Quintus, H. (2002). *Simple Performance Test for Superpave Mix Design - NCHRP Report 465*. Washington, DC: Transportation Research Board, Nation Research Council.
- Youdale, G. (1983). *Investigation of the Variation of Stiffness with Depth of a Granular Layer under Variable Thickness of Asphaltic Concrete*. Sydney: Report to WG.
- Youdale, G. P. (1984). *Review of Limiting Subgrade Strain Criteria*. Sydney: Report to WG.
- Zamhari, K. A., James, E. M., & Jameson, G. (2017). *Manual Desain Perkerasan jalan - No. 02/M/BM/2017, edisi 2*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

