

ANGKA EKIVALEN MDP-2017 (MDP-2017 LOAD EQUIVALENCY FACTORS)

Aloysius Tjan

Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung, Indonesia
e-mail: aloysius@unpar.ac.id

Diterima: 25 Februari 2020; direvisi: 21 Juli 2020; diterima: 4 Desember 2020

ABSTRAK

Angka ekivalen sebagai perbandingan tingkat kerusakan sumbu tertentu terhadap beban sumbu standar adalah usaha menyederhanakan proses desain. Tiap metode desain dapat mempunyai nilai ekivalen yang berbeda dibandingkan dengan metode lain. MDP 2017 yang mengacu pada Austroads 2008 membedakan angka ekivalen untuk penggunaan tertentu, seperti ESA4 untuk perkerasan dengan beton aspal kurang dari 100 mm dan berpondasi material berbutir, dan ESA5 untuk lapis permukaan beton aspal lebih dari 100 mm dan berpondasi berbutir. ESA4 juga digunakan untuk desain lapis tambah dengan kriteria deformasi permanen, sedangkan ESA5 untuk desain tebal lapis tambah dengan kriteria retak lelah. Berdasarkan pendekatan mekanistik empiris dan transfer function yang dipakai oleh MDP pada berbagai model tebal struktur yang dianalisis, maka dapat disimpulkan bahwa nilai angka ekivalen bersifat unik tergantung pada beban, jenis sumbu, tebal struktur perkerasan, dan modulus tanah dasar, yaitu EALF Austroads. Disarankan analisis struktur perkerasan MDP, terutama kriteria retak lelah tidak menggunakan ESA5 bahkan tidak menggunakan pendekatan angka ekivalen. Dalam desain tebal perkerasan, disarankan menganalisis batas repetisi masing-masing beban dan jenis sumbu pada struktur, serta menggabungkan dampak merusak dari seluruh lalu lintas dengan hipotesa Miner.

Kata Kunci: angka ekivalen, ESA4, ESA5, Austroads, MDP

ABSTRACT

Equivalent Standard Axle Load as a ratio of damaging effect of any axle load to standard axle load is a simplification to pavement design. However each design method may have a unique value. MDP 2017 adopts the main principles of Austroads 2008, such as its transfer function of the mechanistic empirical approach. MDP uses different load equivalency factor for a particular pavement structure, i.e. ESA4 for a thin (less than 100 mm) asphalt concrete surface layer with granular base course, and ESA5 for thick (more than 100 mm) asphalt concrete surface course with granular base course. For overlay design, ESA4 for pavement with permanent deformation criterion, and ESA5 for fatigue criterion. Analysis on various pavement thicknesses and based on transfer function of the Austroads on the mechanistic empirical approach, it concludes that EALF Austroads is a unique value and depends on axle load, axle type, pavement structure and subgrade resilient modulus. It is suggested for not applying ESA5 and in general equivalent axle load factor in the MDP pavement structure analysis, especially on fatigue crack criterion. For pavement design, it is proposed analysis of maximum load repetition for every load and axle type and then combined the damage from each of them with Miner's hypothesis.

Keywords: axle load equivalency factor, ESA4, ESA5, Austroads, MDP

PENDAHULUAN

Angka ekivalen dalam desain perkerasan lentur dan kaku (baik baru maupun lapis tambah/*overlay*) dikenal di berbagai metode empiris maupun mekanistik empiris. Beberapa metode itu antara lain berbagai versi AASHTO perkerasan lentur dan kaku (AASHTO (1972), AASHTO (1986), AASHTO (1993)), SNI 03-1732 (1989), berbagai Pedoman (antara lain (Pd T-01-2002-B 1992), (Pd T-05-2005-B 2005)), Shell (Shell 1978), Asphalt Institute (Asphalt Institute 1991), berbagai versi Austroads perkerasan lentur (NAASRA (1979), Austroads (2008), Austroads (2017)), dan MDP perkerasan lentur (James and Jameson (2013), Zamhari, James, and Jameson (2017)). Namun ada juga beberapa metode desain yang tidak mengenal angka ekivalen, seperti antara lain PCA (Packard 1984), Pd T14-2003 (2003), Austroads untuk perkerasan kaku (Austroads (2008), Austroads (2017)) dan MDP perkerasan kaku (James and Jameson (2013), Zamhari, James, and Jameson (2017)), maupun metode desain MEPDG (NCHRP 2004).

Bagi metode desain yang menggunakan angka ekivalen, semuanya mempunyai definisi yang sama, yaitu sebagai perbandingan tingkat kerusakan akibat beban sumbu tidak standar terhadap tingkat kerusakan beban sumbu standar (AASHTO 1972). Angka ekivalen digunakan untuk mengubah repetisi sumbu tidak standar menjadi repetisi sumbu standar agar mempunyai dampak merusak yang sama. Mengubah repetisi sumbu tidak standar menjadi repetisi sumbu standar membuat desain tebal perkerasan menjadi sederhana, karena hanya menghitung berdasarkan repetisi sumbu standar, yaitu ESA (*equivalent standard axle*), ESAL (*equivalent standard axle load*), atau CESA (*cummulative equivalent standard axle*).

Pada bagian perkerasan lentur Manual Desain Perkerasan Jalan, MDP (Zamhari, James and Jameson 2017), dikenal VDF (*vehicle damage factor*) yaitu jumlah angka ekivalen semua sumbu dari kendaraan tertentu. VDF pada MDP dibedakan menjadi VDF4 berdasarkan ESA4 dan VDF5 berdasarkan ESA5. ESA4 adalah angka ekivalen berdasarkan prinsip *fourth power law*, sedangkan ESA5 dengan formulasi seperti *fourth power law* namun dengan pangkat 5.

MDP adalah metode desain perkerasan yang mengacu metode Austroads. Untuk beban lalu lintas yang besar, metode Austroads menggunakan pendekatan mekanistik empiris. Angka ekivalen MDP untuk lalu lintas yang besar itu dapat dianalisis dengan menggunakan *transfer function* mekanistik empiris MDP, karena angka ekivalen adalah perbandingan tingkat kerusakan. *Transfer function* MDP sama dengan yang digunakan Austroads.

Fokus penelitian ini adalah apakah angka ekivalen ESA5 yang digunakan MDP maupun Austroads ketika mendesain perkerasan lentur berlapis pondasi batu pecah dan beban besar selaras dengan *transfer function* yang digunakan.

HIPOTESA

Angka ekivalen ESA5 untuk perkerasan lentur dengan lapis pondasi batu pecah pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) tidak selaras dengan *transfer function* yang digunakan pada proses mekanistik empiris.

METODOLOGI

Penelitian menggunakan pendekatan mekanistik empiris, dan *transfer function* Austroads. Regangan yang menentukan dihitung dengan program KENPAVE akibat beban sumbu yang dimodelkan Austroads untuk sumbu tunggal roda tunggal, dan sumbu

tunggal roda ganda pada beberapa struktur perkerasan lentur yang dianalisis.

KAJIAN PUSTAKA

Angka Ekuivalen

Besarnya angka ekuivalen pada berbagai metode sering kali tidak sama, seperti angka ekuivalen SNI 03-1732 (1989) dan AASHTO (1972). Walaupun demikian, di suatu metode, angka ekuivalen beban sumbu tertentu mempunyai besaran yang tetap. SNI 03-1732 (1989) memformulasikan angka ekuivalen dengan Pers. 1 yang berarti angka ekuivalen dipengaruhi oleh beban dan jenis sumbu. Persamaan seperti ini juga dikenal dengan istilah *fourth power law*.

$$EALF = k \left(\frac{P}{8.16} \right)^4 \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- EALF = angka ekuivalen
- k = konstanta, 1 untuk sumbu tunggal, dan 0.086 untuk sumbu tandem
- P = beban sumbu, ton

AASHTO memformulasikan angka ekuivalen dengan cara yang berbeda yaitu Pers 2 (AASHTO 1972). W_{18} adalah repetisi beban sumbu standar (18 kips atau 8.16 ton pada sumbu tunggal roda ganda) sehingga perkerasan rusak, dan W_x adalah repetisi beban sumbu sebarang sehingga perkerasan rusak. Kedua repetisi yang diperbandingkan dihitung pada struktur perkerasan yang identik. Angka ekuivalen bagi beban sumbu sebarang itu diperoleh dari Pers. 2. Formulasi yang sama juga digunakan oleh Pedoman No 12-SE-M-2013 (2013).

Angka ekuivalen perkerasan lentur AASHTO (EALF AASHTO) dihitung dengan Pers. 2 sd 6. Angka ekuivalen AASHTO tidak hanya dipengaruhi oleh beban dan jenis sumbu, tetapi juga kekuatan struktur perkerasan (SN), serta kriteria kondisi rusak perkerasan (p_t).

$$EALF = \frac{W_{18}}{W_x} \dots\dots\dots (2)$$

$$\log \frac{W_{18}}{W_x} = 4.79[\log(L_{1x} + L_{2x}) - \log(18 + 1)] - 4.33\log(L_{2x}) + \frac{G_t}{\beta_{18}} - \frac{G_t}{\beta_x} \dots\dots (3)$$

$$G_t = \log \left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_{18} = 0.40 + \frac{0.081(18+1)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_{1x}+L_{2x})^{3.23}}{(SN+1)^{5.19}(L_{2x})^{3.23}} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

- W_{18} = repetisi beban sumbu standar, 18 kips
- W_x = repetisi beban sumbu tunggal atau tandem atau triple, x kips
- L_{1x} = beban sumbu x, kips
- L_{2x} = jenis sumbu berbeban x, 1 sumbu tunggal, 2 tandem, dan 3 triple
- p_t = indeks permukaan saat rusak, tergantung fungsi jaringan jalan seperti tol, arteri, kolektor atau lokal
- SN = structural number

Berbeda dari metode di atas, angka ekuivalen yang konstan tidak berlaku pada desain perkerasan lentur MDP, maupun Austroads sampai dengan metode tahun 2012 (Austroads 2012). MDP membedakan antara angka ekuivalen menjadi ESA4 dan ESA5, yaitu ESA4 untuk pangkat 4 pada Pers. 7 bagi desain empiris dan ESA5 untuk pangkat 5 bagi desain mekanistik empiris.

Demikian pula dengan Austroads yang membedakan angka ekuivalen menjadi ESA Austroads, SAR5, SAR7 dan SAR12, yang dihitung dengan Pers. 7. ESA Austroads (atau ESA4) untuk $m = 4$. Untuk konstanta lain ditulis sebagai SAR m , sehingga ada SAR5, SAR7, atau SAR12. Austroads menetapkan $m = 4$ untuk desain empiris. Untuk desain mekanistik empiris, m ditentukan berdasarkan jenis kerusakan yang terjadi. Untuk kerusakan retak leleh, $m = 5$, untuk deformasi permanen (perkerasan dengan pondasi batu pecah), $m = 7$, sedangkan untuk perkerasan dengan lapis pondasi *cement treated*, $m = 12$. Sehingga nilai angka ekuivalen selain tergantung beban

dan jenis sumbu, juga oleh jenis struktur serta tipe kerusakan.

$$SARm_{ij} = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i}\right)^m \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

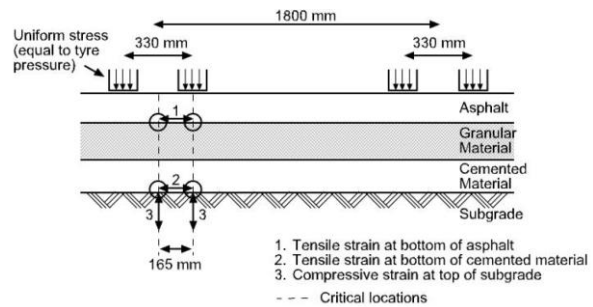
- L_{ij} = beban j pada sumbu i, kN
- SL_i = beban standar pada sumbu i, yaitu 53 kN untuk sumbu tunggal roda tunggal, 80 kN sumbu tunggal roda ganda, 135 kN sumbu tandem roda ganda, 181 kN sumbu triple roda ganda, dan 221 kN sumbu quad roda ganda. Catatan: 80 kN = 8.16 ton = 18 kips.
- m = konstanta, 4 untuk metode empiris, 5 untuk kriteria retak lelah, 7 untuk kriteria deformasi permanen, 12 untuk *cemented base*

Secara prinsip MDP 2017 (Zamhari, James and Jameson 2017) mengacu pada metode Austroads 2008 (Austroads 2008). MDP menggunakan ESA4 untuk desain perkerasan dengan tebal lapis permukaan < 100 mm serta beban lalu lintas ≤ 4 juta ESA (untuk 20 tahun). Sedangkan untuk tebal lapis permukaan ≥ 100 mm dan beban ≥ 4 juta ESA (untuk 20 tahun) digunakan ESA5. Austroads menggunakan ESA5 (atau SAR5) untuk perkerasan yang tebal, beban besar, serta di desain dengan mekanistik empiris.

Publikasi terbaru Austroads baik untuk desain perkerasan baru (Austroads 2017) maupun untuk tebal lapis tambah (Austroads 2019) tentang angka ekivalen sudah berubah, sekalipun tidak ada perubahan *transfer function* untuk kriteria deformasi maupun retak lelah. Kedua versi Austroads tersebut menggunakan angka ekivalen hanya untuk kriteria deformasi permanen. Untuk kriteria retak lelah, dampak merusak setiap beban sumbu dihitung berdasarkan regangan tarik sumbu tunggal roda tunggal atau sumbu tunggal roda ganda. Regangan tarik akibat sumbu tandem dan sumbu *triple* dihitung secara proporsional dari regangan sumbu tunggal roda ganda. Untuk menganalisis dampak merusak dari semua beban sumbu, dampak merusak masing-masing beban sumbu digabung menggunakan hipotesa Miner.

Model Perkerasan Lentur

Menurut Austroads, beban sumbu tunggal roda ganda dimodelkan seperti Gambar 1. Dalam penelitian ini perkerasan lentur dimodelkan dengan lapis pondasi batu pecah, sehingga regangan yang ditinjau adalah no 1 dan 3 pada Gambar 1. Regangan maksimum yang ditinjau di no 1 berkorelasi dengan repetisi beban yang menyebabkan retak lelah, N_f , dan no 2 dengan deformasi permanen, N_d . Korelasi regangan dengan repetisi beban dinyatakan dalam *transfer function*.



Gambar 1. Model Beban Sumbu Tunggal Roda Ganda pada Perkerasan Lentur (Austroads 2012)

Transfer Function Austroads

Transfer function mekanistik empiris dapat berbeda antar institusi yang menggunakannya. Hal ini terjadi karena jenis campuran beraspal, iklim, pola pembebanan lalu lintas serta pengalaman setempat yang berbeda. Semuanya diekspresikan dalam *transfer function* yang digunakan. *Transfer function* metode Austroads seperti Pers. 8 dan 9 Austroads (2008, 2012, 2017, 2019).

$$N_f = RF \left(\frac{6918(0.856V_b + 1.05)}{E^{0.36} \mu \epsilon_t} \right)^5 \dots\dots\dots (8)$$

$$N_d = \left(\frac{9300}{\mu \epsilon_c} \right)^7 \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- RF = 1 untuk desain dengan tingkat keandalan 95%
- V_b = persentase volume aspal terhadap volume total campuran
- E = modulus dinamis lapis permukaan (campuran beraspal0, MPa)
- $\mu\epsilon_t$ = regangan tarik horizontal di bagian bawah lapis permukaan (no 1 pada Gambar 1), $\times 10^{-6}$
- $\mu\epsilon_c$ = regangan tekan vertikal di bagian atas lapis tanah dasar (no 3 pada Gambar 1), $\times 10^{-6}$

Angka Ekuivalen MDP

Angka ekuivalen MDP ada dua jenis, yaitu ESA4 dan ESA5. Formulasi ESA4 dan ESA5 pada dokumen cikal bakal MDP, yaitu James E. M. (2011) belum terlalu jelas maksudnya. Pada MDP versi selanjutnya menjadi lebih jelas, yaitu untuk ESA4 menggunakan Pers. 7. Persamaan ini sama dengan penentuan angka ekuivalen di Pedoman (Pd T-05-2005-B 2005).

MDP menonjolkan penggunaan VDF (*vehicle damage factor*) yaitu total angka ekuivalen semua sumbu kendaraan. Sehingga MDP menyajikan nilai VDF (baik VDF4 berdasarkan ESA4, maupun VDF5 berdasarkan ESA5) untuk berbagai jenis kendaraan – berdasarkan data berat kendaraan (Zamhari, James and Jameson 2017). Untuk kriteria retak lelah, perbandingan antara VDF5 terhadap VDF5 atau ESA5 terhadap ESA4 antara 1.8-2.0.

Pada MDP tidak pernah secara tegas menjelaskan teori dan perhitungan ESA5, kecuali dengan mengalikan ESA4 dengan faktor 1.8-2.0 tadi. Berdasarkan metode Austroads, dikenal SAR5 yang dihitung dengan Pers. 7 dan ini diduga adalah yang dimaksud dengan ESA5.

Angka Ekuivalen Austroads

Berdasarkan pendekatan mekanistik empiris, dan formulasi angka ekuivalen (Pers. 2), maka EALF Austroads dihitung berdasarkan perbandingan umur akibat beban sumbu standar terhadap umur akibat beban sumbu tidak standar. Umur ini adalah repetisi minimum dari kriteria retak lelah, N_f atau kriteria deformasi permanen, N_d .

Apabila umur beban standar maupun beban tidak standar ditentukan berdasarkan kriteria yang sama, maka angka ekuivalen dapat disederhanakan menjadi $EALF_{fatigue}$ dihitung dengan Pers. 10 untuk kriteria retak lelah, dan $EALF_{rut}$ dihitung dengan Pers. 11 untuk kriteria deformasi permanen.

Pangkat 5 dan 7 dari persamaan EALF sama dengan pangkat pada Pers. 7, yang dikenal dengan SAR5 dan SAR7. EALF diperoleh dari perbandingan regangan, sedangkan SAR diperoleh dari perbandingan beban sumbu. Austroads menyamakan $EALF_{fatigue}$ dengan SAR5 dan $EALF_{rut}$ dengan SAR7.

$$EALF_{fatigue} = \left(\frac{\epsilon_{tx}}{\epsilon_{t18}} \right)^5 \dots\dots\dots (10)$$

$$EALF_{rut} = \left(\frac{\epsilon_{cx}}{\epsilon_{c18}} \right)^7 \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

- ϵ_{tx} = regangan tarik horizontal akibat beban sumbu x
- ϵ_{t18} = regangan tarik horizontal akibat beban sumbu standar
- ϵ_{cx} = regangan tekan vertikal akibat beban sumbu x
- ϵ_{c18} = regangan tekan vertikal akibat beban sumbu standar

Regangan Akibat Beban Sumbu

Dari ke dua *transfer function* di atas terlihat bahwa angka ekuivalen tergantung pada *transfer function* – yaitu pangkat dari regangan. Selain itu perbandingan regangan antara beban tidak standar dengan beban sumbu standar.

Pers. 7 merupakan formulasi angka ekuivalen Austroads. Untuk sumbu tunggal roda ganda, berdasarkan kriteria retak lelah, pangkat 5 pada Pers. 7 akibat asumsi bahwa perbandingan regangan $\frac{\epsilon_{tx}}{\epsilon_{t18}}$ sama dengan perbandingan beban sumbu $\frac{L_{ij}}{SL_i}$. Pangkat 7 untuk kriteria deformasi permanen juga mengasumsikan hal yang sama.

Untuk sumbu tunggal roda tunggal, sumbu tandem roda ganda, ataupun sumbu tripel roda ganda, penyebut Pers. 7 bukanlah beban sumbu standar yaitu sumbu tunggal roda ganda dengan beban 80 kN (atau 18 kips atau 8.16 ton), melainkan regangan akibat beban standar sesuai

masing-masing jenis sumbunya. Beban standar sumbu tunggal roda tunggal (SASW) 53 kN, sumbu tandem roda ganda (TADW) 135 kN, dan sumbu tripel roda ganda (TrADW) 181 kN. Akan tetapi pada Pers. 10 dan 11 penyebutnya adalah regangan akibat beban sumbu standar dan berlaku untuk semua jenis sumbu yang regangannya diperbandingkan.

Untuk membandingkan angka ekuivalen, EALF dari Pers. 10 dan 11 dengan angka ekuivalen SAR5 dan SAR7 dari Pers. 7 tidak dapat dilakukan tanpa analisis numerik. Ini disebabkan karena regangan tidak diperoleh dari *closed form solution* melainkan berdasarkan perhitungan *multilayer elastic theory*. Perhitungan regangan dilakukan dengan program KENPAVE, sehingga diperoleh regangan akibat beban tidak standar maupun akibat beban standar sesuai jenis sumbunya, serta akibat beban sumbu standar pada suatu tebal struktur dan daya dukung lapis tanah dasar tertentu. Perhitungan itu juga dilakukan pada berbagai beban tidak standar demikian pula dengan berbagai tebal struktur perkerasan.

HASIL DAN ANALISIS

Pada Suatu Struktur Perkerasan

Struktur perkerasan lentur yang dianalisis adalah $h_1 = 100$ mm, $h_2 = 400$ mm, $E_3 = 70$ MPa. Jenis sumbu yang dianalisis adalah sumbu tunggal roda tunggal (SASW) dengan rentang beban 10-70 kN, sumbu tunggal roda ganda (SADW) dengan rentang beban 10-120 kN, sumbu tandem roda ganda (TADW) dengan rentang beban 2—240 kN, dan sumbu triple roda ganda (TrADW) dengan rentang beban 30-360 kN.

Berdasarkan hasil analisis numerik, diperoleh nilai maksimum dari regangan tarik horizontal di bagian bawah lapis permukaan, maupun regangan tekan vertikal di bagian atas lapis tanah dasar dari tiap beban dan jenis sumbu. Regangan tersebut digunakan untuk menghitung:

1. EALF (Austroads) dihitung dengan Pers. 2, sebagai implementasi definisi angka ekuivalen. Repetisi beban standar maupun tidak standar adalah minimum dari N_f dan N_d yang dihitung dengan Pers. 8 dan 9 sesuai dengan *transfer function* Austroads. EALF Austroads adalah

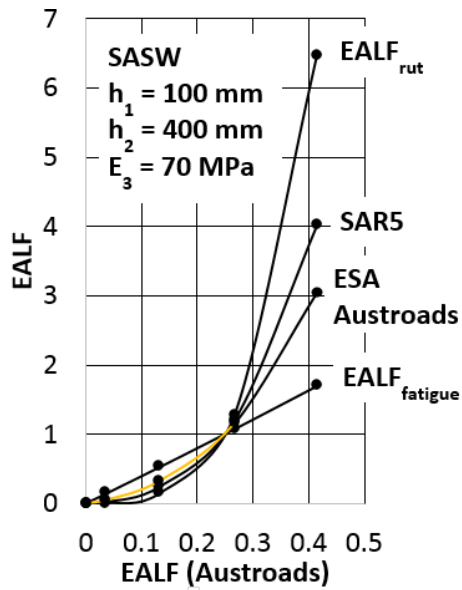
angka ekuivalen yang mencerminkan dampak dari penggunaan *transfer function* Austroads.

2. $EALF_{rut}$ dihitung dengan Pers. 11. Regangan tekan vertikal akibat beban tidak standar maupun standar diperoleh dari analisis numerik. $EALF_{rut}$ ini berlaku hanya jika kriteria rusak deformasi permanen yang menentukan baik untuk beban standar maupun tidak standar. Syarat ini dapat terpenuhi pada beberapa struktur dan tidak berlaku pada struktur yang lain.
3. $EALF_{fatigue}$ dihitung dengan Pers. 10. $EALF_{fatigue}$ juga berlaku dengan syarat kriteria retak lelah yang menentukan baik untuk beban tidak standar maupun standar. Syarat ini juga dapat terpenuhi pada beberapa struktur dan tidak berlaku pada struktur yang lain.
4. SAR5 dan ESA Austroads dihitung dengan Pers. 7, dimana $m = 5$ untuk SAR5 dan $m = 4$ untuk ESA Austroads, dan SL_i disesuaikan dengan angka ekuivalen jenis sumbu yang dianalisis.

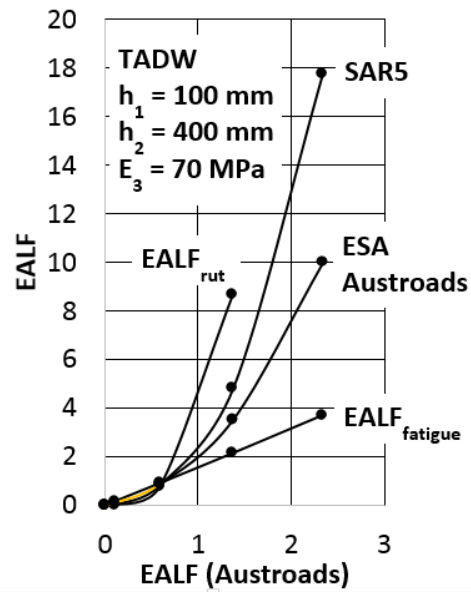
Berdasarkan struktur perkerasan dan berbagai beban dihitung regangan tekan dan tarik yang menentukan agar dapat dianalisis EALF (Austroads), $EALF_{rut}$, $EALF_{fatigue}$, SAR5 dan ESA Austroads. Hasil berbagai jenis angka ekuivalen di sajikan pada Gambar 2 (untuk beban dengan sumbu SASW), Gambar 3 (STDW), Gambar 4 (TADW), dan Gambar 5 (TrADW),

Akibat sumbu tunggal roda tunggal (SASW), sumbu tandem (TADW) maupun sumbu tripel (TrADW) dengan berbagai beban yang dihitung, angka ekuivalen ($EALF_{rut}$, $EALF_{fatigue}$, SAR5, ESA Austroads) yang diperoleh lebih besar daripada EALF Austroads. Padahal EALF Austroads adalah angka ekuivalen yang mencerminkan dampak dari *transfer function* yang digunakan.

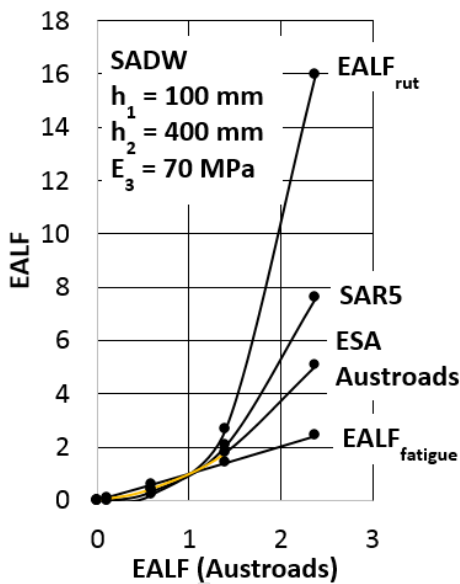
Akibat sumbu tunggal roda ganda (SADW) dengan berbagai beban yang dihitung, angka ekuivalen ($EALF_{rut}$, SAR5, ESA Austroads) yang diperoleh lebih besar daripada EALF Austroads. Untuk kasus struktur ini EALF Austroads sama dengan $EALF_{fatigue}$, karena untuk semua kasus beban, kriteria retak lelah yang menentukan.



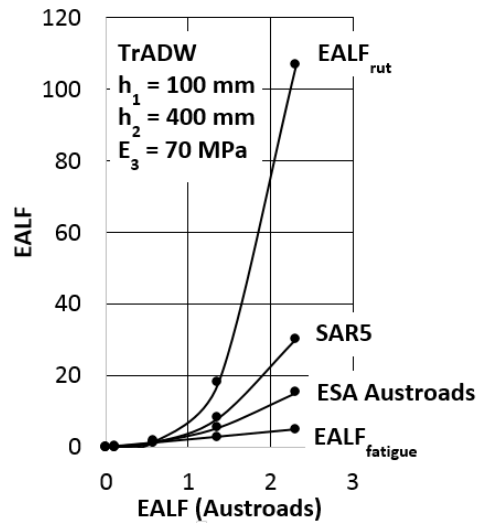
Gambar 2. EALF Sumbu Tunggal Roda Tunggal



Gambar 4. EALF Sumbu Tandem Roda Ganda



Gambar 3. EALF Sumbu Tunggal Roda Ganda



Gambar 5. EALF Sumbu Tripel Roda Ganda

Pada Beberapa Struktur Perkerasan

Untuk mendapatkan hasil yang lebih umum, analisis numerik diperluas pada 3 modulus resilien tanah dasar yang lain, yaitu 30, 50, dan 100 MPa. Tiga struktur lain dianalisis pula, yaitu: $h_1 = 50 \text{ mm}$ dan $h_2 = 100 \text{ mm}$, $h_1 = 200 \text{ mm}$ dan $h_2 = 300 \text{ mm}$, serta $h_1 = 200 \text{ mm}$ dan $h_2 = 400 \text{ mm}$, dengan ke empat modulus resilien tanah dasar.

EALF Austroads untuk semua sumbu (SASW, SADW, TADW, TrADW) pada struktur yang dianalisis tampak seperti Gambar 6. Sebagai cerminan dari angka ekivalen yang sesuai dengan *transfer function*, maka tampak angka ekivalen bukanlah suatu nilai yang unik untuk beban dan sumbu tertentu. Beban dan sumbu tertentu mempunyai dampak merusak yang berbeda – tergantung pada tebal struktur dan kondisi lapis tanah dasar. Sehingga tidak ada sederhana untuk mendapatkan angka ekivalen yang akurat, kecuali dengan membandingkan repetisi beban sumbu standar terhadap repetisi beban tidak standar pada struktur perkerasan yang dianalisis.

EALF Austroads dibandingkan dengan EALF_{fatigue} seperti Gambar 7. Sebagian besar kedua angka ekivalen ini ada di sekitar *equality line*, ini disebabkan kriteria rusak retak lelah yang menentukan untuk beban standar maupun tidak standar. Beberapa EALF_{fatigue} lebih kecil atau lebih besar, karena pada saat itu terjadi perbedaan kriteria rusak antara beban standar dan beban tidak standar.

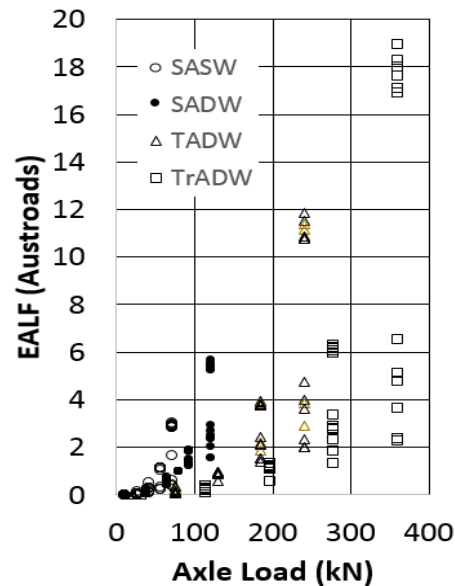
Sekarang analisis umur retak lelah struktur perkerasan lentur tidak digunakan lagi angka ekivalen beban seperti pada metode Austroads versi terakhir (Austroads (2017) dan Austroads (2019)).

EALF Austroads dibandingkan dengan EALF_{rut} seperti Gambar 8. Sebagian besar EALF_{rut} lebih besar daripada EALF Austroads. Ini disebabkan karena kriteria deformasi permanen baik untuk beban standar maupun tidak standar hanya terjadi pada sebagian kecil kasus struktur yang dianalisis.

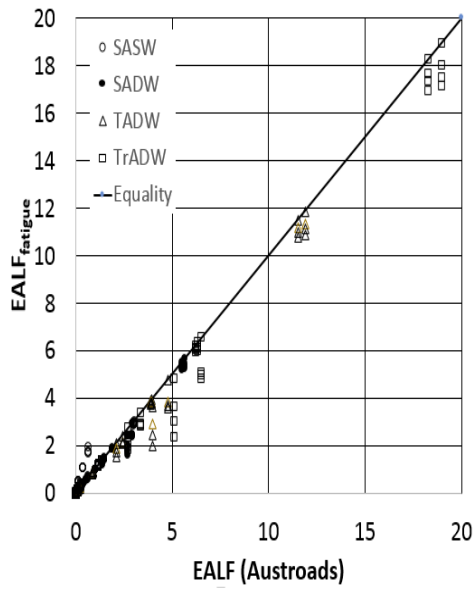
MDP menyatakan bahwa ESA5 atau SAR5 dari Pers. 7 dengan $m = 5$ digunakan untuk kasus mekanistik empiris. Austroads menggunakan SAR5 ini untuk kasus retak lelah. Gambar 9 memperlihatkan perbandingan EALF Austroads dengan ESA5 (SAR5). Semua ESA5 (SAR5) sama atau lebih besar daripada EALF Austroads. Sebagian besar angka ekivalen SAR5 dan EALF Austroads yang berada di *equality line* adalah sumbu tunggal roda ganda (SADW) dan angka ekivalen tidak lebih dari 2. Untuk jenis sumbu lain, angka ekivalen SAR5 lebih besar daripada angka ekivalen yang sesungguhnya.

MDP menggunakan ESA4 untuk kasus analisis dengan empiris. Perbandingan EALF Austroads dengan ESA4 tampak pada Gambar 10. Beberapa kasus ESA4 lebih besar daripada EALF Austroads, dan pada kasus lain lebih kecil. ESA4 dan EALF Austroads berada di sekitar *equality line* untuk sumbu tunggal roda ganda (SADW) dan angka ekivalen tidak lebih dari 2.

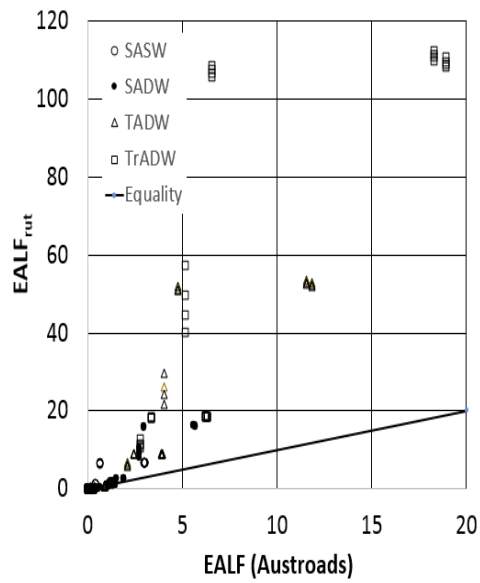
Gambar 11 memperlihatkan perbandingan antara EALF_{fatigue} dengan ESA5 (SAR5). Apabila EALF_{fatigue} dapat didekati dengan ESA5 (SAR5), artinya rasio regangan tarik sama dengan rasio beban. Dari Gambar 11 terlihat kedua angka ekivalen tidak semua kasus berada pada *equality line*, ini berarti tidak untuk semua kasus perbandingan regangan sama dengan perbandingan beban sumbu. Sehingga perhitungan EALF_{fatigue} tidak dapat didekati dengan ESA5 (SAR5), terutama yang memberi dampak angka ekivalen yang besar. Untuk angka ekivalen SADW yang tidak lebih dari 2, pendekatan ini tampaknya masih dapat dilakukan.



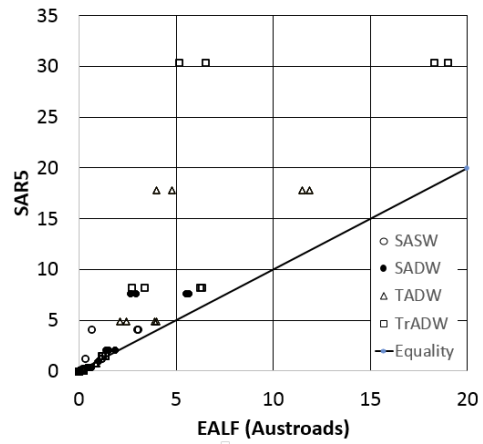
Gambar 6. Hubungan Beban Sumbu dengan EALF Austroads



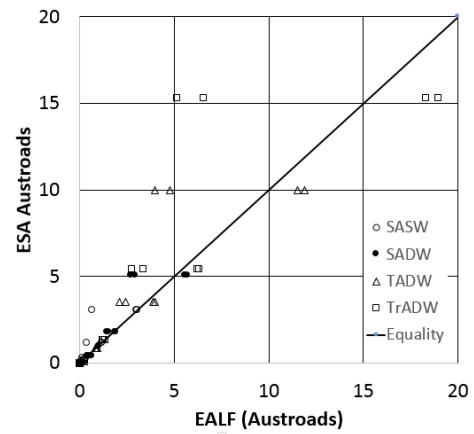
Gambar 7. Hubungan EALF Austroads dengan EALF_{fatigue}



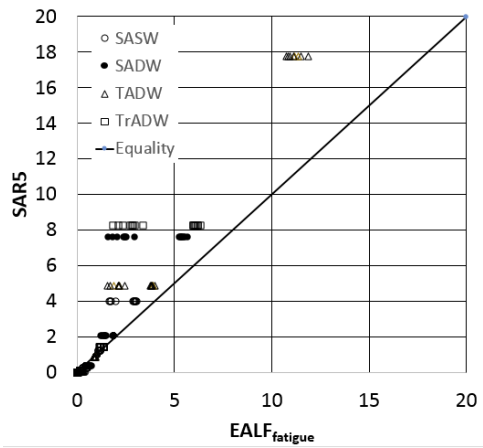
Gambar 8. Hubungan EALF Austroads dengan EALF_{rut}



Gambar 9. Hubungan EALF Austroads dengan SAR5



Gambar 10. Hubungan EALF Austroads dengan ESA Austroads



Gambar 11. Hubungan EALF_{fatigue} dengan SAR5

PEMBAHASAN

EALF Austroads adalah angka ekivalen yang sesuai dengan definisi angka ekivalen serta mencerminkan *transfer function* Austroads yang digunakan dalam proses mekanistik empiris, seperti juga yang digunakan MDP. Angka ekivalen ini secara umum tidak dapat dicari dengan cara lain yang lebih sederhana, misalnya dengan perbandingan beban dengan pangkat tertentu. Ini disebabkan angka ekivalen tidak hanya ditentukan oleh besar beban dan jenis sumbu melainkan juga oleh tebal struktur perkerasan serta modulus resilien tanah dasar.

Berlakunya $EALF_{rut}$ maupun $EALF_{fatigue}$ mensyaratkan kriteria yang sama (deformasi permanen atau retak lelah) menentukan dalam analisis akibat beban tidak standar maupun beban standar. Apabila kriteria rusak yang sama tidak terjadi akibat beban tidak standar dan standar, maka $EALF_{rut}$ maupun $EALF_{fatigue}$ tidak berlaku.

Untuk semua beban, jenis sumbu dan struktur perkerasan yang dianalisis, sebagian besar umurnya ditentukan berdasarkan kriteria retak lelah. Ini tampak dari sebagian besar $EALF_{fatigue}$ dan EALF Austroads berada di sekitar *equility line*.

Jika $EALF_{fatigue}$ ingin didekati dengan cara sederhana, yaitu dengan SAR5 atau ESA5, hal itu hanya dapat dilakukan untuk SADW dan dengan beban yang memberikan angka ekivalen tidak lebih dari 2. Untuk jenis sumbu lain tidak disarankan didekati menggunakan ESA5, karena menghasilkan angka ekivalen yang lebih besar dari yang seharusnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Desain MDP berdasarkan pendekatan mekanistik empiris dan *transfer function* yang digunakan Austroads. Angka ekivalen MDP seharusnya sesuai dengan *transfer function* tersebut, dan besarnya adalah EALF Austroads. Angka ekivalen EALF Austroads tidak hanya tergantung pada besar beban dan jenis sumbu, tetapi juga dipengaruhi oleh tebal struktur dan modulus resilien lapis tanah dasar. Sehingga tidak ada angka ekivalen yang unik bagi beban dan jenis

sumbu yang berlaku untuk sebarang struktur perkerasan.

Sebagian besar kombinasi beban, jenis sumbu dan struktur yang dianalisis umurnya ditentukan oleh kriteria retak lelah. Oleh karena itu sebagian besar $EALF_{fatigue}$ yang diperoleh sama dengan EALF Austroads.

Jika ingin memperoleh angka ekivalen dengan cara sederhana, yaitu menggunakan ESA5, maka pendekatan ini hanya disarankan dipakai untuk sumbu tunggal roda ganda dan beban yang menghasilkan angka ekivalen tidak lebih dari 2. Beban yang lebih besar maupun jenis sumbu yang lain, menghasilkan angka ekivalen yang lebih besar dari yang seharusnya.

Secara umum ESA4 atau ESA Austroads juga tidak sama dengan EALF Austroads. Pendekatan memperoleh EALF Austroads dengan ESA4 disarankan hanya untuk sumbu tunggal roda ganda dengan beban yang mengakibatkan angka ekivalen tidak lebih dari 2.

Saran

Disarankan metode mekanistik empiris MDP tidak menggunakan angka ekivalen dalam analisis retak lelah dalam desain struktur perkerasannya. Sebagai gantinya menganalisis batas repetisi dari setiap tingkat beban dan jenis sumbu dari kendaraan yang diprediksi akan lewat selama umur rencana. Dampak kerusakan akibat setiap beban dan jenis sumbu digabung menjadi kerusakan perkerasan akibat semua lalu lintas dengan menggunakan hipotesa Miner.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 1986. *AASHTO Guide for the Design of Pavements*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- _____. 1972. *AASHTO Interim Guide for the Design of Pavements*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- _____. 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: American

- Association of State Highway and Transportation Officials.
- 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.
- _____. 1991. *Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets- Manual Series No 1 (MS-1)*. Lexington, KY: Asphalt Institute.
- Austrroads. 2017. *Guide to Pavement Technology Part 2, Pavement Structural Design*. Sydney: Austrroads.
- _____. 2019. *Guide to Pavement Technology Part 5: Pavement Evaluation and Treatment Design, AGPT05-19*. Sydney: Austrroads.
- _____. 2012. *Guide to Pavement Technology, Part 2: Pavement Structural Design*. Sydney: Austrroads.
- _____. 2008. *Pavement Design - A Guide to the Structural Design of Pavements*. Sydney, NSW, Australia: Austrroads, Ltd.
- James, E M. 2011. *New Pavement Structures, Pavement Design Supplement: Part I, Road Sector Development Program, Package 3 – Activity #201*. Jakarta: Indonesia Infrastructure Initiative.
- James, Edward, and Geoffrey Jameson. 2013. *Manual Desain Perkerasan Jalan - No 02/M/BM/2013*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum.
- 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.
- Packard, R G. 1984. *Thickness Design for Concrete Highway and Streets Pavements*. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- 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 T-05-2005-B. 2005. *Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah.
- Pd T14-2003. 2003. *Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*. Jakarta: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- 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.
- Zamhari, Kemas Ahmad, Edward Malcom James, and Geoffrey Jameson. 2017. *Manual Desain Perkerasan jalan - No. 02/M/BM/2017, edisi 2*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.