

Kajian Temperatur Rata-rata Tertimbang (WMAPT) pada Desain Perkerasan Lentur Studi Kasus Ruas Cikampek-Pamanukan Sta 20+100

Aloysius Tjan

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

Raden Hisyam Syauqi Al-Ghifari

Universitas Katolik Parahyangan – Program Studi Teknik Sipil, Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung.

Abstrak

Desain tebal perkerasan lentur dipengaruhi oleh temperatur lokasi – hal ini tampak jelas pada metode desain mekanistik empiris ketika menentukan modulus dinamis campuran beraspal. Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) menetapkan temperatur wakil atau WMAPT sebesar 41°C sedangkan Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah menetapkan temperatur standar 35°C. Studi ini menganalisis temperatur wakil atau WMAPT dengan pendekatan mekanistik empiris. Data jenis sumbu, beban sumbu dan temperatur tiap jam diperoleh pada Ruas Cikampek-Pamanukan Sta 20+100. Hasil analisis memperlihatkan WMAPT tidak dipengaruhi oleh tebal struktur perkerasan, modulus resilien lapis tanah dasar, sehingga berlaku untuk semua tebal struktur dan daya dukung tanah dasar, namun dipengaruhi oleh komposisi beban lalu lintas. Di lokasi studi, diperoleh WMAPT rata-rata sebesar 34.71°C dan deviasi standar 0.5°C. Menetapkan WMAPT yang lebih tinggi dari yang sesungguhnya (seperti yang direkomendasikan oleh Manual Desain Perkerasan Jalan, yaitu 41°C) berpotensi memperpendek hasil analisis umur perkerasan. Hasil studi ini juga mendukung penggunaan temperatur standar pada Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah yaitu 35°C.

Kata Kunci: WMAPT, temperatur perkerasan, mekanistik empiris, Manual Desain Perkerasan Jalan

Abstract

Thickness of flexible pavement design is affected by location temperature - this is evident in the empirical mechanistic design method when determining the dynamic modulus of asphalt mixtures. MDP recommends the representative temperature or WMAPT of 41°C while Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah recommends standard temperature of 35°C. This study analyzes the representative temperature or WMAPT with an empirical mechanistic approach. Data on axle types, axle loads and hourly temperatures are obtained for Cikampek-Pamanukan STA 20 + 100 Section. The results of the analysis showed that WMAPT is independent of pavement thickness, and subgrade resilient modulus, therefore it is valid for various pavement thickness and subgrade resilient modulus, however it depends on traffic load composition. At the study location, it is obtained an average WMAPT of 34.71°C with standard deviation of 0.5°C. Determination of WMAPT that is higher than it should be (as recommended by MDP, which is 41°C) has a potential to reduce the results of pavement life analysis. The results of this study support the standard temperature of 35°C used in Pedoman Perencanaan Tebal Lapis Tambah.

Keywords: WMAPT, pavement temperature, mechanistic empirical, Manual Desain Perkerasan Jalan

1. Pendahuluan

Perkerasan lentur adalah struktur perkerasan yang mempunyai beberapa lapis (dari atas ke bawah), yaitu: lapis permukaan (berupa campuran beraspal), lapis pondasi (lapis batu pecah), lapis pondasi bawah (batu pecah atau sirtu), dan lapis tanah dasar (tanah yang dipadatkan secara mekanis dengan maupun tanpa stabilisasi secara kimiawi). Perkerasan terpapar dengan kondisi lingkungan, seperti sinar matahari, dan temperatur udara. Keduanya mempengaruhi temperatur perkerasan, yang pada gilirannya pada modulus campuran beraspal. Dampak iklim dan temperatur menjadi topik yang dibahas oleh berbagai literatur seperti antara lain Croney dan Bulman (1972),

Claessen, et al. (1977), Asphalt Institute (1982), NCHRP (2004). Austroads (2017) dan Pszczola (2019). Croney dan Bulman khusus membahas dampak iklim pada lapis tanah dasar maupun lapis pondasi dan pondasi bawah. Lima literatur lain membahas dampak fluktuasi temperatur dalam desain perkerasan. Mencari umur perkerasan akibat perubahan fluktuasi temperatur dilakukan dengan berbagai cara. Umumnya publikasi itu menyederhanakan pengaruh fluktuasi temperatur menjadi satu temperatur yang mewakili dengan dampak yang sama pada umur perkerasan. Umur perkerasan dicari tanpa memperhitungkan beban lalu lintas yang terjadi pada masing-masing temperatur. Pengecualian terjadi pada NCHRP (2004). Namun

NCHRP tidak mencari temperatur wakil, dan metode tersebut dimaksudkan untuk langsung digunakan dalam desain.

Makalah ini membahas proses perhitungan temperatur perkerasan wakil (WMAPT) yang memperhatikan fluktuasi temperatur udara maupun beban lalu lintas yang terjadi pada tiap periode fluktuasi temperatur. Analisis umur perkerasan dilakukan dengan metode mekanistik empiris, dan data temperatur udara maupun beban lalu lintas pada ruas Jalan Cikampek-Pamanukan Sta 20+100.

2. Desain Tebal Perkerasan Lentur Metode Mekanistik Empiris

Ada berbagai metode desain tebal perkerasan yang dikenal, seperti antara lain teoritis, empiris, dan mekanistik empiris (Huang 2004). Secara garis besar, metode mekanistik empiris terdiri dari dua proses utama, yaitu mekanistik dan empiris. Proses mekanistik adalah tahap menghitung satu atau beberapa parameter mekanis, seperti tegangan, regangan, atau lendutan – akibat beban sumbu kendaraan pada struktur perkerasan. Parameter mekanis ini dipengaruhi oleh jenis sumbu, beban sumbu, tebal lapis struktur, modulus dan angka Poisson bahan di setiap lapis. Parameter mekanis yang dihitung kemudian dikorelasikan dengan tingkat kerusakan (berdasarkan hasil uji di laboratorium serta dikalibrasi dengan hasil di lapangan) yang disebut sebagai *transfer function*. Perkerasan dinyatakan rusak secara struktural apabila telah mengalami retak leleh (*fatigue cracking*) atau deformasi permanen pada tapak roda (*rut*) dengan batasan tertentu.

Berbagai publikasi seperti Peattie (1962), Skok & Finn (1962), Brown & Pell (1972), Claessen, Edwards, Sommer, & Uge (1977), Shell (1978), Bonnaure, Gravois, & Udron (1980), Asphalt Institute (1982), Asphalt Institute (1991), El-Basyouny & Witczak (2005) menyatakan bahwa parameter mekanis regangan tarik horizontal maksimum di bagian bawah lapis permukaan campuran beraspal berkorelasi dengan repetisi beban yang menimbulkan retak leleh yang timbul secara *bottom-up crack*. Ada pula pendapat yang mengatakan bahwa retak dapat pula dimulai dari atas (*top down crack*) seperti antara lain dibahas oleh Maher & Uzarowski (2010), yaitu akibat temperatur yang rendah pada perkerasan.

Menurut Peattie (1962), Skok & Finn (1962), Brown & Pell (1972), Claessen, Edwards, Sommer, & Uge (1977), Shell (1978), Asphalt Institute (1982), Asphalt Institute (1991), Chen, Lin, Stein, & Hothan (2004) parameter mekanis regangan tekan vertikal di bagian atas lapis tanah dasar berkorelasi dengan repetisi beban yang menimbulkan deformasi permanen (*rut*). Deformasi permanen yang tampak di permukaan dapat terjadi akibat berbagai kombinasi deformasi, yaitu deformasi permanen di lapis permukaan serta deformasi permanen pada lapis struktur perkerasan di bawah lapis permukaan.

Prediksi repetisi beban yang menimbulkan retak leleh

maupun deformasi permanen berdasarkan hasil uji material di laboratorium yang dikalibrasi dengan kenyataannya di lapangan. Perbedaan ini disebabkan kondisi pengujian di laboratorium tidak dapat memodelkan semua yang terjadi di lapangan. Perbedaan itu antara lain temperatur yang terkontrol di laboratorium – hal tidak terjadi di lapangan. Pembebanan di laboratorium mempunyai pola frekuensi tertentu, sedangkan di lapangan beban lewat secara random baik jenis sumbu, beban sumbu, maupun waktu kedatangannya. Untuk menghasilkan prediksi yang akurat dari model mekanistik ini, diperlukan faktor kalibrasi. Untuk proses kalibrasi diperlukan data empirik – atau disebut sebagai proses empirik.

Selain kondisi pengujian di laboratorium tidak dapat memodelkan keadaan di lapangan, kriteria umur leleh di laboratorium juga menggunakan kriteria yang berbeda. Di laboratorium suatu bahan telah mengalami retak leleh berdasarkan kriteria kontrol tegangan atau kontrol regangan. Sedangkan di lapangan suatu perkerasan dinyatakan telah mengalami rusak fatik berdasarkan tercapainya luasan daerah yang telah mengalami retak leleh (retak buaya), Besarnya faktor kalibrasi dan validasi ini dapat mencapai faktor beberapa ratus (Asphalt Institute 1982).

Berbeda dengan pembebanan di laboratorium yang besarnya konstan dan pola yang tetap, maka untuk memprediksi kerusakan akibat variasi beban di lapangan digunakan hipotesa Miner (*Miner's Rule*) – lihat Miner (1945) yang diacu oleh Huang (2004). Hipotesa Miner mengatakan bahwa kerusakan terjadi jika $D = 1$, yang dihitung dengan Persamaan (1).

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Dengan:

n_i = Jumlah pengulangan akibat beban –i

N_i = Jumlah pengulangan yang menyebabkan fatigue atau deformasi permanen akibat beban –i

D = Rasio kerusakan – telah mencapai batas apabila nilai $D = 1$

Metode mekanistik empiris terus mengalami penyempurnaan – hal ini diuraikan oleh Haas (2010) terutama *transfer function* – yaitu korelasi parameter mekanis dengan repetisi beban yang menyebabkan perkerasan rusak. Metode mekanistik empiris seperti diuraikan di atas, dapat digunakan untuk memperoleh WMAPT – yang tidak bisa dilakukan oleh metode teoritis maupun empiris.

3. Pemodelan Struktur Perkerasan Lentur

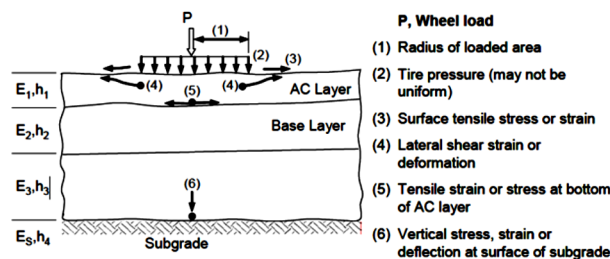
Model struktur perkerasan dan lokasi yang dianalisis secara mekanis adalah seperti pada **Gambar 1**. Setiap lapis struktur perkerasan dianalisis sebagai lapis yang homogen, elastis dan isotropis, lebar tiap lapis tidak terbatas, demikian juga tebal lapis tanah dasar. Model struktur ini dikenal sebagai *half space*. Parameter yang digunakan untuk memprediksi umur leleh dan umur deformasi adalah regangan yang dihitung dengan

program ELSYM5 (Ahlborn 1972). Umur lelah berkorelasi dengan regangan tarik (no 5 pada Gambar 1) dan umur deformasi berkorelasi dengan regangan tekan (no 6 pada Gambar 1). Perbedaan hasil perhitungan mekanis akibat beban dinamis yang dianalisis sebagai beban statis dibahas Waterhouse (1967). Dalam batas tertentu analisis statis yang lebih sederhana memberikan hasil yang masih dapat diterima.

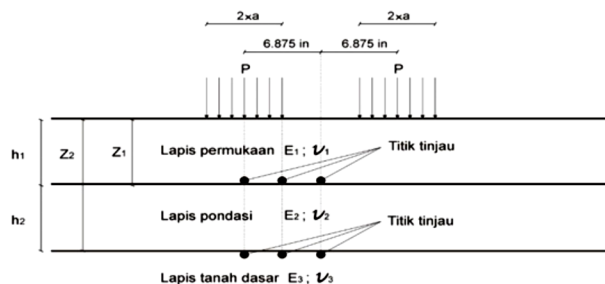
Beban yang dianalisis adalah beban standar, yaitu beban sumbu tunggal roda ganda 80 kN (18 kips). Tapak setiap roda diasumsikan berupa sebuah lingkaran. Jarak pusat lingkaran kedua roda adalah 345 mm (13.75 in). Tekanan bidang kontak yang uniform sebesar 483 kPa (70 psi). Beban sumbu standar ini dimodelkan seperti Gambar 2.

Ada berbagai struktur perkerasan lentur yang dikenal, seperti konvensional (*deep strength*), *full depth asphalt*, maupun *perpetual pavement*. *Full depth pavement* merupakan struktur perkerasan yang semua lapis di atas lapis tanah dasar dibuat dari campuran beraspal. Perkerasan berkelanjutan adalah perkerasan yang kerusakannya hanya pada lapis permukaan, dan telah banyak dipublikasikan seperti antara lain dipaparkan oleh Maher & Uzarowski (2010). Di Indonesia, kedua jenis struktur perkerasan ini belum menjadi kebijakan konstruksi perkerasan. Perkerasan *deep strength* terdiri dari lapis beraspal dan beberapa lapis batu pecah, namun analisis perkerasan yang terdiri dari 3 lapis, yaitu lapis permukaan campuran beraspal, lapis pondasi batu pecah, dan lapis tanah dasar cukup memadai (Brown and Dawson 1992). Kombinasi tebal struktur perkerasan untuk analisis WMAPT ini mempunyai kombinasi tebal struktur seperti Tabel 1.

Variasi angka Poisson di dalam analisis mekanis tidak terlalu berpengaruh. Untuk lapis permukaan, lapis pondasi dan lapis tanah dasar adalah berturut-turut 0,4, 0,45, 0,45 seperti yang disarankan oleh Yoder & Witczak



Gambar 1 Model struktur perkerasan yang dianalisis secara mekanis (Haas 2010)



Gambar 2 Titik tinjau regangan dalam model struktur perkerasan

Tabel 1 Struktur Perkerasan yang Dianalisis

Lapis Permukaan (mm, in)	Lapis Pondasi (mm, in)	Lapis Tanah Dasar (psi)
50 (1,97)	200 (7,87)	4.500; 7.500; 12.000
125 (4,92)	350 (13,78)	4.500; 7.500; 12.000
200 (7,87)	500 (19,68)	4.500; 7.500; 12.000

(1975). Ada tiga titik lokasi regangan tarik horizontal, dan tiga lokasi regangan tekan vertikal yang dihitung, seperti pada Gambar 2.

4. Pemodelan Karakteristik Material Perkerasan Lentur

4.1 Modulus resilien lapis tanah dasar

Sesungguhnya pengujian modulus resilien lapis tanah dasar (E_3) memerlukan waktu dan biaya yang besar. Banyak usaha dilakukan untuk menyederhanakannya dengan menggunakan korelasi modulus dengan parameter lain, seperti dengan CBR yang antara lain dilakukan oleh Claessen, et al. (1977), Shell (1978), Asphalt Institute (1982). Persamaan (2) berlaku untuk E_3 dengan satuan MPa, sedangkan Persamaan (3) dengan satuan psi. Nilai CBR dengan satuan persen.

$$E_3 = 10,3(CBR) \quad (2)$$

$$E_3 = 1500(CBR) \quad (3)$$

Nilai E_3 pada Tabel 1 berdasarkan nilai CBR 3, 5, dan 8%. Rentang nilai CBR ini dianggap memadai sebagai rentang nilai CBR yang terjadi pada perkerasan di lapangan – di sekitar lokasi Sta 20+100 ruas jalan Cikampek-Pamanukan.

4.2. Modulus dinamis campuran beraspal

Modulus dinamis campuran beraspal tidak merupakan bagian dari pengujian rutin. Prediksi nilai modulus dinamis ini seringkali dikaitkan dengan parameter lain yang mudah didapat. Asphalt Institute (1982) dan AASHTO (1993) menghubungkan parameter campuran, temperatur, dan frekuensi beban – seperti Persamaan (4). Persamaan yang berbeda diberikan oleh NCHRP (2004). Parameter campuran ini seringkali berbeda antara hasil desain campuran dan kenyataan campuran di lapangan. Perbedaan ini tidak saja akan mempengaruhi akurasi prediksi modulus dinamis, namun juga kinerjanya sebagai campuran yang dinyatakan dalam umur lehainya – seperti yang dibahas oleh Walther, Wistuba dan Mollenhauer (2010).

$$\log E_1 = 5,553833 + 0,028829 \left(\frac{P_{200}}{p_{0,17033}} \right) - 0,03476 (V_p) + 0,070377 (\eta_{70}^{\circ F}, 10^6) + 0,000005 [T_p^{(1,3+0,49825 \log f)} P_{ac}^{0,5}] - 0,00189 [T_p^{(1,3+0,49825 \log f)} \frac{P_{ac}^{0,5}}{f^{1,1}}] + 0,931757 \left(\frac{1}{p_{0,02774}} \right) \quad (4)$$

$$\eta_{70}^{\circ F}, 10^6 = 29508,2 \times Pen_{77}^{-2,1939} \quad (5)$$

Dengan

E_1 = Modulus dinamis lapis permukaan (psi)

- P_{200} = Persen berat agregat lolos saringan No 200 terhadap berat total agregat, dalam dokumen ini diambil 5%
- F = Frekuensi pembebanan (Hz), dalam dokumen ini diambil sebesar 10 Hz
- V_v = Persen rongga udara dalam campuran (%), dalam dokumen ini diambil 4%
- P_{ac} = Persen berat aspal dalam campuran (%), dalam dokumen ini diambil 4.774%
- $h_{70}^{\circ F}$ = Viskositas aspal pada temperatur 70°F (10⁶ poise), seringkali didekati berdasarkan nilai penetrasi dengan menggunakan Persamaan (5)
- $Pen_{70}^{\circ F}$ = Nilai penetrasi aspal (0.1 mm), dalam dokumen ini diambil nilai penetrasi = 65

4.3. Modulus resilien lapis pondasi batu pecah

Modulus resilien material berbutir tanpa bahan pengikat tergantung pada jumlah tegangan utama yang terjadi pada material tersebut. Semakin besar jumlah tegangan utama, semakin besar pula modulus resiliennya. Penelitian modulus resilien dari material berbutir tanpa bahan pengikat dipublikasi oleh Rada and Witczak (1981). Proses memperoleh tegangan menjadi suatu proses yang iteratif karena modulus resilien diperlukan ketika akan menghitung tegangan. Untuk menyederhanakan proses iterasi ini digunakan penyederhanaan yang hasilnya memadai, seperti yang digunakan dalam pembentukan kurva desain tebal perkerasan metode the Asphalt Institute seperti yang dipublikasikan oleh Asphalt Institute (1982) dan Smith dan Witczak (1981). Penyederhanaan itu yang dipakai dalam analisis WMAPT ini, sebagai persamaan (6).

$$E_2 = 10,447(h_1^{-0,471})(h_2^{-0,041})(E_1^{-0,139})(E_3^{0,287})(k_1^{0,868}) \quad (6)$$

- h_1 = Tebal lapis permukaan campuran beraspal (in)
- h_2 = Tebal lapis pondasi batu pecah (in)
- E_1 = Modulus dinamis lapis permukaan (psi)
- E_2 = Modulus resilien lapis pondasi (psi)
- k_1 = Konstanta yang dipengaruhi oleh bentuk agregat, antara 4000 – 9000, dan dalam dokumen ini dipakai konstanta = 7000

4.4 Hubungan regangan tarik dengan umur lelah

Hubungan regangan tarik dengan umur lelah dapat dengan banyak variasi – tergantung pada lokasi dan penetapan kriteria rusak lelah. Beberapa institusi yang memberikan hubungan tersebut adalah Shell (Shell 1978), the Asphalt Institute (Asphalt Institute 1982), Illinois Department of Transportation (Thompson, et al. 1987), TRRL – UK (Powell, et al. 1984), Belgian Road Research Center (Verstraeten, Veverka and Francken 1987) – secara ringkas dijelaskan dalam Huang (2004). Dalam analisis ini digunakan hubungan yang diberikan oleh The Asphalt Institute – dengan kriteria rusak lelah terjadi pada saat 20% luas permukaan perkerasan mengalami retak lelah, seperti persamaan (7). Pendekatan lelah yang lebih mutakhir dipublikasikan oleh Rodriguez (2010).

$$N_f = 0,079488 \times (\epsilon_r)^{-3,291} (E_1)^{-0,854} \quad (7)$$

4.5 Hubungan regangan tekan dengan umur deformasi

Hubungan regangan tekan dengan umur deformasi dapat ditemukan dengan banyak variasi - tergantung pada lokasi dan penetapan kriteria rusak deformasi permanen. The Asphalt Institute membatasi deformasi permanen sebesar 0.5 in, sedangkan TRRL (Transportation Road Research Laboratory - UK) membatasi sebesar 0.4 in. Ada berbagai persamaan yang menghubungkan antara umur deformasi dengan regangan tekan seperti yang digunakan oleh Shell, TRRL, Belgian Road Research Center, dan the Asphalt Institute (dapat dilihat pada Huang (2004). Persamaan (8) adalah hubungan yang digunakan oleh The Asphalt Institute dalam pembuatan manual desainnya (Asphalt Institute, 1982 dan Asphalt Institute, 1991) yang akan digunakan dalam analisis ini.

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} (\epsilon_c)^{-4,477} \quad (8)$$

4.6 Umur perkerasan dan WMAPT

Umur perkerasan, N, adalah nilai minimum antara N_f dan N_d . Ketika perkerasan dilewati oleh sebanyak N lintasan (jenis sumbu dan beban sumbu yang sama dengan pada saat menghitung regangan), maka perkerasan dinyatakan rusak, karena dengan menggunakan Persamaan (1), rasio kerusakan D = 1. Ini berlaku untuk perkerasan yang mempunyai kondisi perkerasan yang konstan, misalnya modulus lapis permukaan. Apabila modulus campuran beraspal berubah karena perubahan temperatur, maka perlu dilakukan pengembangan konsep tadi.

Temperatur udara berubah-ubah setiap saat (dapat ditinjau dengan periode waktu jam sampai bulan) dan dalam 1 siklus pola perubahan temperatur akan berulang. Siklus perubahan dapat diasumsikan berulang setiap hari, minggu, bulan atau tahun sepanjang umur perkerasan. Claessen, et al. (1977) menggunakan hubungan antara temperatur udara yaitu MMAT (*mean monthly air temperature*) dengan temperatur lapis permukaan di berbagai kedalaman (gradien temperatur). Gradien temperatur ini bermanfaat untuk mendapatkan modulus sub lapis permukaan. Pada setiap nilai MMAT, tebal dan karakteristik bahan struktur perkerasan dapat dihitung regangan maksimumnya. Akibat fluktuasi temperatur udara, dicari regangan efektif (atau regangan wakil dari regangan yang berubah-ubah) yaitu regangan yang menghasilkan umur perkerasan yang sama seperti yang terjadi akibat fluktuasi temperatur. Regangan efektif dihitung dengan Persamaan (9).

$$(\epsilon_{eff})^4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i)^4 \quad (9)$$

- ϵ_{eff} = regangan efektif yang menghasilkan umur perkerasan yang sama seperti akibat fluktuasi temperatur
- ϵ_i = regangan pada periode temperatur i
- n = jumlah periode temperatur tiap siklus

Kriteria kerusakan perkerasan yang digunakan pada **Persamaan (9)** adalah regangan tekan vertikal pada lapis tanah dasar (atau kriteria kedalaman alur). Kerusakan juga ditentukan oleh regangan tarik pada lapis permukaan, yaitu kerusakan retak leleh yang dipengaruhi oleh modulus lapis permukaan. Umur leleh dihitung dengan **Persamaan (7)**. Claessen, et al. (1977) menghitung regangan tarik pada bagian bawah lapis permukaan, 1/3 dan 2/3 tebal lapis permukaan untuk setiap gradien temperatur. Regangan yang maksimum yang digunakan untuk menghitung umur retak leleh. Umur perkerasan akibat fluktuasi temperatur, yaitu umur perkerasan efektif dihitung dengan **Persamaan (10)**.

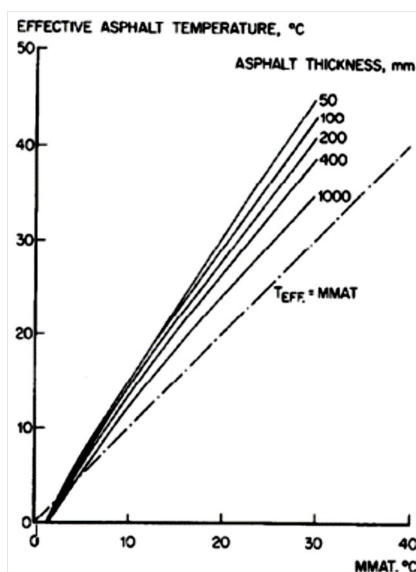
$$N_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i}} \quad (10)$$

N_{eff} = umur perkerasan efektif sebagai kombinasi dari n periode umur perkerasan

N_i = umur perkerasan pada periode temperatur i

n = jumlah periode temperature

Menurut Claessen, et al. (1977), berdasarkan data siklus MMAT, gradien temperatur, serta hubungan modulus campuran beraspal dengan temperatur, maka desain tebal perkerasan dapat dilakukan seperti prosedur di atas. Penyederhanaan analisis regangan dengan tanpa gradien temperatur dilakukan Claessen, et al. (1977) dengan mencari modulus campuran beraspal efektif dan regangan efektif yang menghasilkan umur perkerasan yang sama seperti yang dihitung dengan gradien temperatur. Dari analisis pada berbagai tebal struktur dan campuran beraspal, diperoleh korelasi temperatur udara (dalam hal ini digunakan MMAT – karena diasumsikan siklus tahunan dengan 12 periode bulanan), tebal lapis permukaan dan modulus campuran beraspal efektif. Berdasarkan hubungan tadi diperoleh korelasi temperatur udara (MMAT), modulus campuran efektif dan temperatur lapis permukaan efektif, seperti **Gambar 3**. Temperatur lapis permukaan efektif adalah sebuah



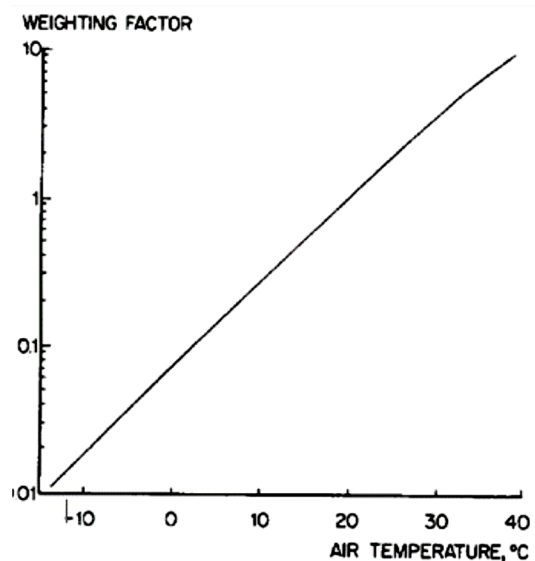
Gambar 3. Hubungan Temperatur Campuran Beraspal Efektif dengan MMAT (Claessen, et al. 1977)

temperatur yang mewakili sifat campuran beraspal dengan gradien temperatur. Pada analisis umur perkerasan dalam 1 siklus tahunan, maka temperatur udara berarti temperatur udara rata-rata tahunan (MAAT – *mean annual air temperature*) yang menghasilkan umur perkerasan seperti akibat fluktuasi temperatur 12 MMAT..

Mendapatkan MAAT dari siklus tahunan yang mempunyai 12 MMAT harus diawali dengan perhitungan kondisi setiap bulan, yaitu: temperatur lapis permukaan efektif, modulus campuran beraspal efektif, regangan efektif dan umur perkerasan, Umur perkerasan efektif dari 1 siklus dengan 12 umur perkerasan dihitung dengan **Persamaan (10)**. Akhirnya dalam analisis 1 siklus diperoleh: regangan efektif, modulus campuran beraspal efektif, dan temperatur lapis permukaan efektif. Temperatur lapis permukaan efektif ini disebabkan oleh besarnya MAAT, Langkah mendapatkan MAAT ini dapat didekati dengan menggunakan faktor pengali berbobot tertentu (*weighting factor*). *Weighting factor* tergantung pada temperatur udara (dalam analisis ini digunakan temperatur bulanan - MMAT) seperti **Gambar 4**. MAAT adalah rata-rata dari MMAT yang dikalikan dengan *weighting factor*.

Prosedur ini diadopsi oleh metode Shell (Shell 1978). Metode Shell juga digunakan Pszczola (2019) ketika menganalisis fluktuasi temperatur yang terjadi di Polandia. Metode Austroads (2017) mengadopsi metode Shell, dan menggunakan istilah WMAAT (*weighted mean annual air temperature*) untuk temperatur udara efektif, sedangkan WMAPT (*weighted mean annual pavement temperature*) untuk temperatur campuran beraspal efektif.

Manual Desain Perkerasan Jalan selanjutnya ditulis sebagai MDP-2013 (James and Jameson 2013), MDP-2017 (Zamhari, James and Jameson 2017) juga mengenal WMAPT. Ke dua edisi MDP tersebut menetapkan WMAPT 38°C untuk daerah pegunungan,



Gambar 4. Weighting Factor sebagai Fungsi Temperatur Udara (Claessen, et al. 1977)

dan 42°C untuk daerah pesisir, atau jika tidak memperhatikan posisi daerahnya ditetapkan 41°C. Untuk keperluan desain tebal lapis tambah, dikenal pula temperatur standar sebesar 35°C menurut No 01/MN/B/1983 (1983), dan Pd T-05-2005-B (2005). Temperatur standar ini menjadi temperatur referensi saat pengukuran lendutan, umur sisa serta tebal lapis tambah. Ketika pengukuran lendutan bukan pada temperatur standar, maka koreksi lendutan harus dilakukan agar menjadi seperti pengukuran pada temperatur standar. Demikian pula dengan tebal lapis tambah yang diperoleh – tebal tersebut harus dikoreksi jika lokasi konstruksi lapis tambah bukan 35°C. Sekalipun pada ke dua dokumen tersebut tidak pernah disebut sebagai WMAPT, namun makna dari temperatur standar adalah temperatur wakil atau temperatur efektif akibat fluktuasi temperatur.

Penentuan temperatur campuran beraspal efektif di atas tidak memperhitungkan pengaruh beban lalu lintas yang lewat pada periode temperatur tersebut. Hal ini benar apabila beban lalu lintas yang konstan di setiap periode (dalam hal ini bulan). Apabila beban lalu lintas yang terjadi juga berfluktuasi, maka rasio kerusakan seperti Persamaan (1) harus digunakan.

Prosedur penentuan temperatur perkerasan efektif yang dilakukan dalam makalah ini adalah menggunakan prinsip beban lalu lintas yang tidak seragam di setiap periode temperatur perkerasan. Satu siklus sebanyak n periode dan setiap periode lewat lalu lintas sebesar n_i

(dalam hal ini menggunakan satuan ESAL). Pada periode itu umur perkerasan yang dihitung dengan **Persamaan 7 dan 8**, adalah N_i . Rasio kerusakan, D , yang terjadi pada 1 siklus dihitung dengan Persamaan (1). Ketika $D < 1$, maka perkerasan masih dapat melayani untuk siklus berikutnya sehingga mencapai $D = 1$. Umur perkerasan efektif dihitung dengan Persamaan (11). Untuk memperoleh temperatur perkerasan efektif, dicari temperatur yang menghasilkan umur perkerasan sebesar N_{eff} dari hubungan N_i dan temperatur perkerasan pada periode i . Dalam makalah ini temperatur tersebut adalah temperatur perkerasan efektif atau WMAPT.

$$N_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{D} \tag{11}$$

Menggunakan modulus lapis permukaan berdasarkan WMAPT menyederhanakan desain tebal perkerasan, namun demikian telah memperhitungkan gradien temperatur pada lapis permukaan, satu siklus fluktuasi temperatur udara dan temperatur perkerasan, serta komposisi beban lalu lintas yang lewat pada periode temperatur yang dianalisis.

5. Data Temperatur dan Beban Sumbu

Data temperatur udara dan beban lalu lintas setiap jam di peroleh dari lokasi di Sta 20+100 ruas jalan Cikampek-Pamanukan adalah data tiap jam selama 24 jam. Sehingga 1 hari adalah 1 siklus dengan periode n

Tabel 2 Temperatur dan beban sumbu pada lokasi yang dianalisis

Waktu (30/10/2015)	MHAT (°C)	MHPT (°C)			Jakarta-Cirebon		Cirebon-Jakarta	
		$h_1 = 5 \text{ cm}$	$h_1 = 12,5 \text{ cm}$	$h_1 = 20 \text{ cm}$	Lambat	Cepat	Lambat	Cepat
ESAL								
00.00-01.00	23,25	31,58	30,71	30,10	261	231	119	0
01.00-02.00	23,34	31,69	30,81	30,20	227	375	107	163
02.00-03.00	23,43	31,79	30,91	30,30	257	265	91	162
03.00-04.00	23,51	31,90	31,02	30,40	215	309	70	117
05.00-06.00	21,78	29,79	28,97	28,40	212	222	121	214
06.00-07.00	20,30	27,99	27,23	26,70	135	186	182	204
07.00-08.00	21,34	29,26	28,46	27,90	155	211	120	178
08.00-09.00	23,43	31,79	30,91	30,30	164	225	125	150
09.00-10.00	29,60	39,29	38,18	37,40	141	214	96	158
10.00-11.00	35,76	46,78	45,44	44,50	147	180	112	167
11.00-12.00	42,02	54,38	52,80	51,70	136	188	96	141
12.00-13.00	22,30	30,42	29,58	29,00	138	186	108	137
13.00-14.00	21,60	29,58	28,77	28,20	131	193	133	167
14.00-15.00	30,46	40,34	39,20	38,40	162	243	95	163
15.00-16.00	32,55	42,87	41,65	40,80	181	232	128	204
16.00-17.00	32,72	43,08	41,86	41,00	178	272	109	199
17.00-18.00	29,94	39,71	38,59	37,80	190	293	141	227
18.00-19.00	21,78	29,79	28,97	28,40	291	341	149	234
19.00-20.00	22,21	30,32	29,48	28,90	317	350	183	261
20.00-21.00	22,56	30,74	29,89	29,30	265	317	177	256
21.00-22.00	22,47	30,63	29,79	29,20	275	282	191	264
22.00-23.00	22,65	30,84	29,99	29,40	249	279	177	254
23.00-24.00	22,82	31,05	30,20	29,60	230	274	145	189

= 24. Temperatur perkerasan dihitung dari temperatur udara dengan **Persamaan (12)**. Persamaan tersebut berdasarkan persamaan Asphalt Institute (1982) dengan modifikasi dari temperatur rata-rata tahunan diubah menjadi rata-rata tiap jam.

$$MHPT = MHAT \times \left(1 + \frac{1}{z+4}\right) - \frac{32}{z+4} + 6 \quad (12)$$

MHPT = Temperatur rata-rata jam-jaman perkerasan (°F)

MHAT = Temperatur rata-rata jam-jaman udara (°F)

z = Kedalaman diambil 1/3 dari tebal lapis permukaan campuran beraspal – h_1 (in)

Data lalu lintas berupa berat sumbu, dan jenis sumbu yang dicatat alat WIM dikonversikan menjadi repetisi sumbu standar (sumbu tunggal roda ganda). Konversi tersebut menggunakan angka ekivalen sesuai dengan Pd T-05-2005-B. Data lalu-lintas dibedakan berdasarkan pencatatan di setiap lajur (lajur lambat dan cepat) dan setiap arah (Jakarta-Cirebon, serta Cirebon-Jakarta). Ke dua data tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2**.

6. Umur Perkerasan dan WMAPT

Perhitungan yang disajikan secara detail adalah untuk tebal lapis permukaan 20 cm, lapis pondasi 50 cm, dan modulus resiliens lapis tanah dasar 12,000 psi, dianalisis berdasarkan temperatur perkerasan jam 00:00 – 01:00, yaitu 30,10°C. Modulus dinamis dihitung dengan Persamaan (4) dan diperoleh 443.377 psi. Kemudian dihitung modulus resiliens lapis pondasi dengan Persamaan (6) dan diperoleh 18.505 psi. Regangan akibat beban sumbu tunggal roda ganda dihitung dengan program ELSYM5 pada posisi seperti **Gambar 2**, diperoleh regangan tarik horizontal maksimum sebesar 1,448E-04, dan regangan tekan vertikal maksimum sebesar 1,875E-04. Umur lelah dihitung dengan Persamaan (7) dan umur deformasi dengan Persamaan (8), yang nilainya adalah $N_f = 5.162.586$ dan $N_d = 66.207.312$, sehingga umur perkerasan, $N = \text{minimum}(N_f, N_d) = 5.162.586$. Umur perkerasan tersebut tercantum pada **Tabel 3**, kolom 3, baris pertama. Selama 1 jam tersebut lewat kendaraan sebesar 261 ESAL (pada lajur lambat arah Jakarta – Cirebon) – lihat **Tabel 2**. Kerusakan yang terjadi, $D = 5.06E-05$.

Proses perhitungan serupa dilakukan pada seluruh jam, sampai dengan jam 23:00 – 24:00. Hasil perhitungan disajikan pada **Tabel 3**. Selama 24 jam tersebut telah lewat sebanyak 4.922 ESAL dengan total kerusakan $D = 1.23E-03$. Sehingga umur perkerasan akibat fluktuasi temperatur dengan beban lalu lintas seperti yang dianalisis diperoleh ketika $D = 1$. Repeti beban (=umur perkerasan) adalah yang menyebabkan $D = 1$, sehingga umur perkerasan adalah 4.001.621 ESAL.

Pada **Tabel 3** telah ada temperatur perkerasan (kolom 2) dan umur perkerasan (kolom 3) yang dianalisis pada struktur perkerasan tertentu ($h_1=20$ cm, $h_2 = 50$ cm, dan $E_3 = 12,000$ psi). Berdasarkan informasi ke dua kolom buat **Gambar 5**. Terlihat bahwa struktur perkerasan mempunyai umur perkerasan yang tergantung pada temperatur perkerasan. Semakin tinggi temperatur perkerasan – semakin pendek umurnya. Hubungan matematis antara umur perkerasan dengan temperature

perkerasan diperoleh dari regresi, yaitu:

$$y = -12,78 \ln(x) + 227,87 \quad (10)$$

Umur perkerasan akibat fluktuasi temperatur telah dihitung sebelumnya, yaitu 4.001.621 ESAL. Nilai ini disubstitusikan ke **Persamaan (13)**, dan menghasilkan temperatur = 34,73°C. Ini adalah temperatur efektif atau WMAPT yaitu temperatur yang menyebabkan umur perkerasan yang sama dengan ketika dianalisis setiap periode fluktuasi temperatur. Ini berdasarkan tebal struktur yang dianalisis, yaitu $h_1=20$ cm, $h_2 = 50$ cm, dan $E_3 = 12,000$ psi.

Analisis juga dilakukan pada tebal struktur yang berbeda (**Tabel 1**). Setiap kombinasi struktur itu dibebani lalu lintas yang sama seperti sebelumnya - berdasarkan lajur dan arah seperti **Tabel 2**. Total ada 36 kombinasi struktur perkerasan yang dianalisis. Hasil temperatur wakil (WMAPT) dari setiap kombinasi struktur dan beban, dicantumkan pada **Tabel 4** kolom terakhir.

Dengan hasil seperti **Tabel 4**, lalu dianalisis untuk mengetahui apakah WMAPT dipengaruhi oleh tebal struktur, atau modulus resiliens tanah dasar, atau lajur dan arah lalu lintas. Pengujian pengaruh variabel itu terjadi jika ada beda nilai rata-rata populasi WMAPT

Tabel 3. Analisis Perkerasan dengan $h_1=20$ cm, $h_2 = 50$ cm, dan $E_3 = 12,000$ psi

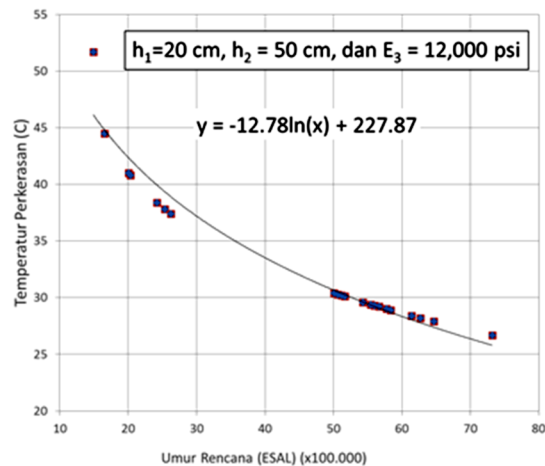
Waktu	T (°C)	N	ESAL	D
00.00-01.00	30.10	5,162,586	261	5.06E-05
01.00-02.00	30.20	5,117,416	227	4.44E-05
02.00-03.00	30.30	5,061,684	257	5.07E-05
03.00-04.00	30.40	5,007,112	215	4.30E-05
04.00-05.00	29.60	5,426,991	261	4.82E-05
05.00-06.00	28.40	6,140,935	212	3.45E-05
06.00-07.00	26.70	7,318,857	135	1.85E-05
07.00-08.00	27.90	6,464,311	155	2.40E-05
08.00-09.00	30.30	5,061,684	164	3.24E-05
09.00-10.00	37.40	2,622,697	141	5.39E-05
10.00-11.00	44.50	1,655,382	147	8.89E-05
11.00-12.00	51.70	1,492,917	136	9.11E-05
12.00-13.00	29.00	5,776,209	138	2.40E-05
13.00-14.00	28.20	6,272,699	131	2.09E-05
14.00-15.00	38.40	2,419,458	162	6.69E-05
15.00-16.00	40.80	2,034,927	181	8.89E-05
16.00-17.00	41.00	2,006,882	178	8.88E-05
17.00-18.00	37.80	2,536,689	190	7.51E-05
18.00-19.00	28.40	6,140,935	291	4.73E-05
19.00-20.00	28.90	5,833,994	317	5.44E-05
20.00-21.00	29.30	5,596,269	265	4.73E-05
21.00-22.00	29.20	5,664,013	275	4.86E-05
22.00-23.00	29.40	5,543,051	249	4.49E-05
23.00-24.00	29.60	5,426,991	230	4.25E-05
Jumlah			4922	1.23E-03
Umur perkerasan				4,001,621

Tabel 4. Temperatur wakil untuk semua kombinasi perkerasan yang dianalisis

No	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	E ₃ (psi)	Lajur	Arah	WMAPT (°C)
1	5.0	20	4.500	Lambat	Cirebon	34.03
2	12.5	35	4.500	Lambat	Cirebon	34.87
3	20.0	50	4.500	Lambat	Cirebon	33.92
4	5.0	20	7.500	Lambat	Cirebon	34.25
5	12.5	35	7.500	Lambat	Cirebon	33.86
6	20.0	50	7.500	Lambat	Cirebon	34.97
7	5.0	20	12.000	Lambat	Cirebon	34.80
8	12.5	35	12.000	Lambat	Cirebon	34.36
9	20.0	50	12.000	Lambat	Cirebon	34.73
10	5.0	20	4.500	Cepat	Cirebon	34.47
11	12.5	35	4.500	Cepat	Cirebon	35.34
12	20.0	50	4.500	Cepat	Cirebon	34.39
13	5.0	20	7.500	Cepat	Cirebon	34.69
14	12.5	35	7.500	Cepat	Cirebon	34.33
15	20.0	50	7.500	Cepat	Cirebon	35.43
16	5.0	20	12.000	Cepat	Cirebon	35.24
17	12.5	35	12.000	Cepat	Cirebon	34.52
18	20.0	50	12.000	Cepat	Cirebon	35.20
19	5.0	20	4.500	Lambat	Jakarta	34.18
20	12.5	35	4.500	Lambat	Jakarta	35.05
21	20.0	50	4.500	Lambat	Jakarta	34.14
22	5.0	20	7.500	Lambat	Jakarta	34.30
23	12.5	35	7.500	Lambat	Jakarta	34.02
24	20.0	50	7.500	Lambat	Jakarta	35.18
25	5.0	20	12.000	Lambat	Jakarta	34.80
26	12.5	35	12.000	Lambat	Jakarta	34.40
27	20.0	50	12.000	Lambat	Jakarta	34.93
28	5.0	20	4.500	Cepat	Jakarta	34.67
29	12.5	35	4.500	Cepat	Jakarta	35.55
30	20.0	50	4.500	Cepat	Jakarta	34.65
31	5.0	20	7.500	Cepat	Jakarta	34.77
32	12.5	35	7.500	Cepat	Jakarta	34.53
33	20.0	50	7.500	Cepat	Jakarta	35.68
34	5.0	20	12.000	Cepat	Jakarta	35.28
35	12.5	35	12.000	Cepat	Jakarta	34.58
36	20.0	50	12.000	Cepat	Jakarta	35.44

Tabel 5 Ringkasan Uji Anova dan Uji t pada Grup WMAPT

Variabel	Grup	Hipotesa H ₀	p Value	Kesimpulan
Uji Anova				
h ₁ atau h ₂	3	Rata-rata WMAPT sama untuk semua kelompok tebal struktur	0.3073	Perbedaan tebal tidak berpengaruh pada WMAPT
E ₃	3	Rata-rata WMAPT sama untuk semua kelompok modulus resilien	0.4326	Perbedaan modulus resilien tanah dasar tidak berpengaruh pada WMAPT
Lajur dan Arah	4	Rata-rata WMAPT sama untuk semua lajur dan arah	0.0319	Tidak semua WMAPT sama untuk semua lajur dan arah
Uji t				
Lajur	2	Rata-rata WMAPT sama untuk lajur cepat maupun lambat	0.0047	Lajur cepat dan lambat mempunyai WMAPT yang berbeda
Arah	2	Rata-rata WMAPT sama untuk arah Cirebon maupun Jakarta	0.3547	Arah lalu lintas tidak berpengaruh besarnya WMAPT



Gambar 5. Umur dan temperatur perkerasan

dari setiap grup. Hal ini dilakukan dengan uji ANOVA yang ringkasannya di tampilkan pada **Tabel 5**. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa tebal perkerasan maupun modulus resilien tanah dasar tidak berpengaruh pada nilai rata-rata WMAPT. Dengan demikian penetapan WMAPT dapat digunakan untuk setiap tebal struktur, maupun daya dukung lapis tanah dasar.

Nilai rata-rata WMAPT berdasarkan grup lajur dan arah lalu lintas menunjukkan tidak semuanya sama, karena hipotesa H_0 ditolak. Analisis lanjutannya dengan uji t, menyatakan nilai rata-rata itu berbeda antara lajur cepat dan lambat, namun untuk perbedaan arah memberikan nilai rata-rata yang sama (seperti tampak pada **Tabel 5**). Perbedaan itu rupanya akibat perbedaan komposisi beban lalu lintas antara lajur cepat dan lambat. Dengan demikian, komposisi beban lalu lintas menentukan besarnya WMAPT.

Dengan hasil seperti **Tabel 4**, lalu dianalisis untuk mengetahui apakah WMAPT dipengaruhi oleh tebal struktur, atau modulus resilien tanah dasar, atau lajur dan arah lalu lintas. Pengujian pengaruh variabel itu terjadi jika ada beda nilai rata-rata populasi WMAPT dari setiap grup. Hal ini dilakukan dengan uji ANOVA yang ringkasannya di tampilkan pada **Tabel 5**. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa tebal perkerasan maupun modulus resilien tanah dasar tidak berpengaruh pada nilai rata-rata WMAPT. Dengan demikian penetapan WMAPT dapat digunakan untuk setiap tebal struktur, maupun daya dukung lapis tanah dasar.

Nilai rata-rata WMAPT berdasarkan grup lajur dan arah lalu lintas menunjukkan tidak semuanya sama, karena hipotesa H_0 ditolak. Analisis lanjutannya dengan uji t, menyatakan nilai rata-rata itu berbeda antara lajur cepat dan lambat, namun untuk perbedaan arah memberikan nilai rata-rata yang sama (seperti tampak pada **Tabel 5**). Perbedaan itu rupanya akibat perbedaan komposisi beban lalu lintas antara lajur cepat dan lambat. Dengan demikian, komposisi beban lalu lintas menentukan besarnya WMAPT.

Berdasarkan komposisi beban lalu lintas seperti pada lokasi studi ini memberikan WMAPT rata-rata 34.71°C dengan deviasi standar 0.5°C .

7. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis ke 36 variasi struktur dan pembebanan lalu lintas pada ruas Cikampek-Pamanukan, Sta 20+100, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Selain oleh temperatur udara, WMAPT tidak dipengaruhi oleh tebal struktur perkerasan, modulus resilien lapis tanah dasar, namun dipengaruhi oleh komposisi beban lalu lintas.
2. WMAPT di lokasi yang di studi adalah 34.71°C dan deviasi standar 0.5°C . Temperatur ini lebih rendah daripada WMAPT 41°C yang direkomendasikan oleh James dan Jameson (2013), maupun Zamhari, James dan Jameson (2017) untuk daerah pesisir. Penetapan WMAPT yang lebih tinggi dari yang seharusnya berpotensi memperpendek hasil analisis umur perkerasan.
3. Temperatur standar No 01/MN/B/1983 (1983), dan Pd T-05-2005-B (2005) sebesar 35°C mendekati nilai WMAPT pada lokasi studi.

8. Saran

Studi lebih lanjut di lebih banyak lokasi dengan mendata jenis sumbu, beban sumbu, serta temperatur perkerasan secara menerus untuk periode siklus yang lebih panjang, dengan demikian dapat dianalisis WMAPT di berbagai wilayah Indonesia. Informasi WMAPT akan meningkatkan akurasi desain perkerasan lentur maupun evaluasi umur sisa perkerasan.

Daftar Pustaka

- AASHTO. 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: American Association of State 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.
- Asphalt Institute. 1982. *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), 9th edition, Research Report 82-2*. Lexington, KY: 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.
- Bonnaure, F, A Gravois, and J Udron. 1980. "A New Method of Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 49 499-529.
- Brown, S F, and A R Dawson. 1992. "Two-Stage Mechanistic Approach to Asphalt Pavement

- Design." *The 7th International Conference on Asphalt Pavements*. Nottingham, UK: University of Nottingham. 16-34.
- Brown, S F, and P S Pell. 1972. "A Fundamental Structural Design Procedure for Flexible Pavements." *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. London, England: University of Michigan. 369-381.
- Chen, Jian-Shiuh, Chih-Shien Lin, Erwin Stein, and Jurgen Hothan. 2004. "Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements." *Journal of Transportation Engineering, Vol 130 Issue 4*.
- Claessen, A I M, J M Edwards, P Sommer, and P Uge. 1977. "Asphalt Pavement Design - The Shell Method." *The 4th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor, MI: University of Michigan. 39-74.
- Croney, D, and J. N Bulman. 1972. "The Influence of Climatic Factors on the Structural Design of Flexible Pavements." *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. London: University of Michigan, Ann Arbor, MI. 67-71.
- El-Basyouny, M, and M Witczak. 2005. "Verification of the Calibrated Fatigue Cracking Models for the 2002 Design Guide." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74*.
- Haas, Ralph. 2010. "Developments and Challenges in Mechanistic – Empirical Pavement Design Methods." *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*. Nagoya, Aichi, Japan: International Society for Asphalt Pavements and Japan Road Association.
- Huang, Yang H. 2004. *Pavement Analysis and Design, 2nd Ed*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc.
- James, Edward, and Jameson, G., 2013. *Manual Desain Perkerasan Jalan - No 02/M/BM/2013*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Maher, M L, and L Uzarowski. 2010. "From Theory to Practice: Rich Bottom Layer Design." *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*. Nagoya, Aichi, Japaan: International Society for Asphalt Pavements and Japan Road Association.
- Miner, M A. 1945. "Cumulative Damage in Fatigue." *Transactions of the ASME, Vol 67 A159-A164*.
- NCHRP. 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.
- No 01/MN/B/1983. 1983. *Manual Pemeriksaan Perkerasan Jalan dengan Alat Benkelman Beam*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum.
- 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.
- Peattie, K R. 1962. "A Fundamental Approach to the Design of Flexible Pavements." *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor, MI: University of Michigan. 403-411.
- Powell, W D, J F Potter, H C Mayhew, and M E Nunn. 1984. *The Structural Design of Bituminous Pavement, Report 1132*. UK: Transportation Road Research Laboratory.
- Pszczola, M. 2019. "Equivalent temperature for design of asphalt pavements in Poland." *MATEC Web of Conferences 262* 1-6.
- Rada, G, and M W Witczak. 1981. "Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Materials." *Transportation Research Record 810* 23-33.
- Rodriguez, M. 2010. "Determination of a New Fatigue Rupture Criterion for Bituminous Mixes." *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*. Nagoya, Aichi, Japan: International Society for Asphalt Pavement and Japan Road Association.
- Shell. 1978. *Shell Pavement Design Manual - asphalt pavements and overlays for road traffic*. London: Shell International Petroleum Company.
- Skok, Eugene L, and Fred N Finn. 1962. "Theoretical Concepts Applied to Asphalt Concrete Pavement Design." *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor, MI: University of Michigan. 412-440.
- Smith, B E, and M W Witczak. 1981. "Equivalent Granular Base Moduli: Prediction." *Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 107, No. TE6* 635-652.
- Thompson, M R, B J Dempsey, H Hill, and J Vogel. 1987. "Characterizing Temperature Effects for Pavement Analysis and Design." *Transportation Road Research 1121* 14-22.
- Verstraeten, J, V Veverka, and L Francken. 1987. "Rational and Practical Design of Asphalt

Pavements to Avoid Cracking and Rutting." *The 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Delft: The Delft University of Technology, the Netherlands. 45-58.

Walther, A, M Wistuba, and K Mollenhauer. 2010. "Analysis of Asphalt Mix Performance Properties Considering the Discrepancy between Mix Design and in-field Realization – Part II: Effect on Asphalt Pavement Design." *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*. Nagoya, Aichi, Japan: International Society for Asphalt Pavements and Japan Road Association.

Waterhouse, A. 1967. "Stresses in Layered Systems under Static and Dynamic Loadings." *Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor, MI: University of Michigan. 291-308.

Yoder, E J, and M W Witczak. 1975. *Principles of Pavement Design, 2nd Ed*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.

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.

