

PREDIKSI KERUSAKAN RETAK STRUKTURAL PADA PERKERASAN LENTUR DESAIN MENURUT PEDOMAN BINA MARGA DENGAN MENGGUNAKAN MODEL HDM-4

Pandu Gultom

Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa no. 10 Bandung
Telp: (022)2502350, Fax: (022) 2502350
doe9oel@students.itb.ac.id

Aghnia Alia Ayesha

Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa no. 10 Bandung
Telp: (022)2502350, Fax: (022) 2502350
aghniaaliaayesha@ymail.com

Djunaedi Kosasih

Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa no. 10 Bandung
Telp: (022)2502350, Fax: (022) 2502350
drkosasih@gmail.com

Yohannes Ronny

Bidang Teknik Jalan Puslitbang
Jalan dan Jembatan
Departemen Pekerjaan Umum
Jl.A.H. Nasution No.264 Bandung Telp:
(022)7802251,Fax:(022)7802726
yohannes.ronny@pusjatan.pu.go.id

Abstract

HDM-4(Highway Development and Management) is developed by the World Bank as a tool for preparing yearly road network maintenance program. It assesses both the condition of pavement structures and the cost-benefit of maintenance scheme over entire life cycle period. An attempt has been conducted to validate particularly the most crucial structural crack prediction model of HDM-4 on a controled pavement, consisting of two sections with different SNP (Structural Number of Pavement) values. These pavement sections are designed using Bina Marga design guide Pd T-01-2002-B for 1,5 and 3,0 mESA load repetitions, which are equivalent to about one and two-month design life under APT (Accelerated Pavement Test) respectively. Should the pavement sections fail due to structural cracking, the area of cracking observed on the surface pavement at the end of the design life will be about 30% of total surface area. This paper outlines the prediction of time to initial cracking and its progression.

Keywords: prediction of crack damage, APT, the model HDM-4, Bina Marga design guideline.

Abstrak

HDM-4 (*Highway Development and Management*) dikembangkan oleh Bank Dunia sebagai alat dalam penyusunan program pemeliharaan jaringan jalan tahunan. HDM-4 menilai baik kondisi suatu struktur perkerasan maupun biaya dan keuntungan dari usulan kegiatan pemeliharaan selama periode siklus ekonomi. Suatu usaha telah dilaksanakan untuk memvalidasi khususnya model prediksi retak berdasarkan HDM-4 pada perkerasan terkontrol, yang terdiri dari dua seksi dengan nilai ITP (Indeks Tebal Perkerasan) yang berbeda. Kedua seksi perkerasan tersebut didesain berdasarkan pedoman desain Bina Marga Pd T-01-2002-B untuk repetisi beban lalu lintas sebesar 1,5 dan 3,0 mESA masing-masing setara dengan satu dan dua bulan waktu pengujian APT (*Accelerated Pavement Test*). Jika kedua seksi perkerasan runtuh akibat retak struktural, maka luas retak yang diamati pada permukaan perkerasan di akhir umur rencana akan berkisar sekitar 30% dari total luas permukaan. Makalah ini menguraikan tentang prediksi awal terjadinya retak struktural dan bagaimana perkembangannya.

Kata Kunci : prediksi kerusakan retak, APT, model HDM-4, pedoman desain bina marga

PENDAHULUAN

Struktur perkerasan yang memikul beban lalu lintas yang tinggi dan secara terus-menerus akan menyebabkan terjadinya penurunan kualitas struktur perkerasan tersebut. Kerusakan retak struktural merupakan salah satu jenis kerusakan yang sering (dominan) terjadi pada struktur perkerasan jalan. Faktor utama yang mengakibatkan terjadinya retak struktural adalah karena akumulasi dari beban lalu lintas yang sudah tidak mampu dipikul oleh struktur perkerasan tersebut. Kerusakan retak yang terjadi pada struktur perkerasan lama kelamaan akan menyebabkan lubang apabila tidak dilakukan perbaikan pada waktu yang tepat. Oleh karena itu, dibutuhkan model yang dapat memprediksikan kerusakan retak pada suatu struktur perkerasan.

HDM-4 (*Highway Development and Management*, generasi ke-4) adalah Sistem Manajemen Perkerasan (SMP) yang dikembangkan oleh Bank Dunia. Model HDM-4 merupakan model prediksi kerusakan yang dapat digunakan untuk memperkirakan untuk memperkirakan awal terjadinya kerusakan pada suatu struktur perkerasan jalan dan bagaimana perkembangannya. Dengan model prediksi tersebut, diharapkan kita dapat menyusun program pemeliharaan suatu jaringan jalan dan kita dapat menghitung *life cycle cost* jalan tersebut. Model prediksi kerusakan yang dibahas pada jurnal penelitian ini adalah model prediksi kerusakan retak struktural. Model ini memprediksikan kapan awal terjadinya dan bagaimana perkembangan kerusakan retak struktural tersebut.

Accelerated Pavement Test (APT) adalah aplikasi dari model pembebanan roda kendaraan dengan beban standar yang berlaku atau lebih, baik pada model struktur lapisan perkerasan maupun struktur lapisan perkerasan aktual untuk menentukan respon dan kinerja dari struktur perkerasan tersebut secara terkontrol dengan akumulasi kerusakan yang dipercepat pada periode waktu tertentu (Metcalf, 1996 [1]). Secara khusus pengujian APT dibagi menjadi 2 tipe yaitu, (1) *test track* yang didesain khusus untuk dilewati oleh kendaraan secara aktual dan (2) sistem pembebanan mekanis yang dapat menyediakan simulasi pembebanan pada struktur perkerasan *existing* atau pada struktur perkerasan yang sengaja dibangun untuk dilakukan pengujian. Pada penelitian ini, pengujian APT dilakukan menggunakan sistem pembebanan mekanis yang dapat menyediakan simulasi pembebanan dengan menggunakan alat uji *Heavy Vehicle Simulator* (HVS). Alat uji ini mampu mensimulasikan beban lalu lintas selama 20 tahun dalam 3 hingga 6 bulan pengujian saja, yang dapat membantu *engineer* untuk memahami kerusakan yang terjadi pada suatu struktur perkerasan dalam rentang waktu yang lebih singkat.

Struktur perkerasan yang menjadi objek penelitian ini dibangun di Pusjatan Bandung dan dilakukan simulasi beban lalu lintas yang melewatinya dengan pengujian APT. Beban lalu lintas yang dihasilkan dari pengujian APT digunakan pada model prediksi kerusakan retak struktural HDM-4. Dilakukan modifikasi tebal pada masing-masing lapisan perkerasan untuk mengetahui bagaimana model prediksinya. Analisis awal terjadinya keretakan struktural dan perkembangan luas retak yang dihasilkan melalui model prediksi tersebut kemudian akan dibandingkan dengan hasil pengamatan pada pengujian APT (di lapangan). Hasil yang diharapkan nantinya dapat menjadi pertimbangan terhadap desain pedoman, manual, dan spesifikasi yang sudah ada.

MODEL RETAK HDM-4

Retak Struktural

Model prediksi kerusakan retak yang menjadi acuan pada jurnal penelitian ini, mengacu pada buku *Highway Development and Management Tools* (HDM-4) yang dikeluarkan oleh Bank Dunia. HDM-4 membagi kerusakan retak menjadi 2 yaitu retak struktural dan retak refleksi. Pada makalah ini, yang menjadi topik pembahasan adalah retak struktural.

Awal terjadinya kerusakan retak struktural dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$ICX = K_{icx} * \left[a_0 * \exp \left(\frac{\alpha_1 * YE_4}{\left(\frac{ITP}{2,54} \right)^2} \right) \right] \quad (1)$$

Dimana:

- ICX = Awal terjadinya retak struktural, tahun
- K_{icx} = Faktor inisiasi retak struktural
- a_0, a_1 = Koefisien model inisiasi retak struktural
- YE4 = Beban sumbu standar, mESA/tahun
- ITP = Indeks Tebal Perkerasan

Dan untuk menghitung perkembangan dari retak struktural tersebut, dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$dNE_4 = \min[AGE_2 - ICX, 1] * YE_4 \quad (2)$$

Perkembangan dari retak struktural terjadi pada saat $dNE_4 > 0$ or $ACX_a > 0$

$$\text{if } ACX_a \geq 50 \text{ then } z = -1, \text{ otherwise } z = 1 \quad (3)$$

$$ACX = \max(ACX_a, 0.5) \quad (4)$$

$$SCX = \min[ACX, (100 - ACX)] \quad (5)$$

$$Y = \left[(z * a_0 * (ITP/2,54)^{a_1} * a_2 * dNE_4) + SCX^{a_2} \right] \quad (6)$$

$$\text{if } Y < 0 \text{ then } dACX = K_{pcx} * (100 - ACX) \quad (7)$$

$$\text{if } Y \geq 0 \text{ then } dACX = K_{pcx} * z * [Y^{(1/a_2)} - SCX] \quad (8)$$

if $ACX \leq 50$ and $(ACX + dACX) > 50$ then

$$C = \max[\left((2 * 50^{a_2}) - SCX^{a_2} - (a_0 * (ITP/2,54)^{a_1} * a_2 * dNE_4) \right), 0] \quad (9)$$

$$dACX = K_{pcx} * [100 - C^{(1/a^2)} - SCX] \quad (10)$$

Dimana :

- ACX_a = Luas retak struktural pada awal tahun, persen
- dNE4 = Peningkatan beban sumbu standar, mESA/lajur
- dACX = Peningkatan luas retak struktural, persen
- a² = Nilai koefisien model perkembangan retak struktural
- K_{pcx} = Faktor perkembangan retak struktural

DESAIN STRUKTUR PERKERASAN UJI

Desain struktur perkerasan yang digunakan pada makalah penelitian ini merupakan desain struktur perkerasan yang digunakan pada pengujian APT. Adapun spesifikasi dari alat uji APT tersebut dapat dilihat pada Tabel 3 berikut :

Tabel 3 Spesifikasi Alat Uji APT

| | |
|-----------------------------------|---------|
| Jumlah Roda (Buah) | 2 |
| Beban Roda, P (kN/Ban) | 20 |
| Jari-Jari Bidang Kontak, r (mm) | 105 |
| Tekanan Angin Ban, q (kPa) | 577,433 |
| Jarak Antar Roda, d (mm) | 340 |
| Panjang Lintasan Roda Uji (m) | 22 |
| Kecepatan Rata-Rata (km/jam) | 11 |
| Waktu Tempuh Rata-Rata (detik) | 2,62 |
| Efisiensi (%) | 75 |
| Lintasan Roda Uji (Lintasan/Hari) | 25.000 |

Untuk desain struktur perkerasan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4 berikut:

Tabel 4 Desain Minimum Struktur Perkerasan Uji APT

| Jenis Lapisan | CBR (%) | Mr (Mpa) | E (Mpa) | Stabilitas Marshall (Kg) | a | m | Dmin (cm) |
|---|---------|----------|---------|--------------------------|-------|---|-----------|
| Subgrade (Tanah Dasar) | 6 | 62,11 | - | - | - | - | - |
| Lapis Pondasi Bawah (Sub Base) Agregat Kelas B | 60 | - | 296,38 | - | 0,125 | 1 | 10 |
| Lapis Pondasi Atas (Base) Agregat Kelas A | 90 | - | 385,76 | - | 0,135 | 1 | 15 |
| Lapis Permukaan (AC-WC) | - | - | 3000 | 800 | 0,4 | - | 6,5 |

Sumber : Pedoman Perancangan Tebal Perkerasan Lentur

Nilai Probabilitas yang digunakan adalah 90%, sehingga didapatkan nilai Z_r = -1,282. Untuk nilai dari deviasi standar-nya (So) diasumsikan bernilai 0, sebab roda pada alat uji APT tetap pada lintasannya. Nilai I_{po} = 4,0 dan nilai I_{pt} = 2,5. Lintasan roda uji APT dikonversi menjadi beban sumbu truk 2 sumbu.

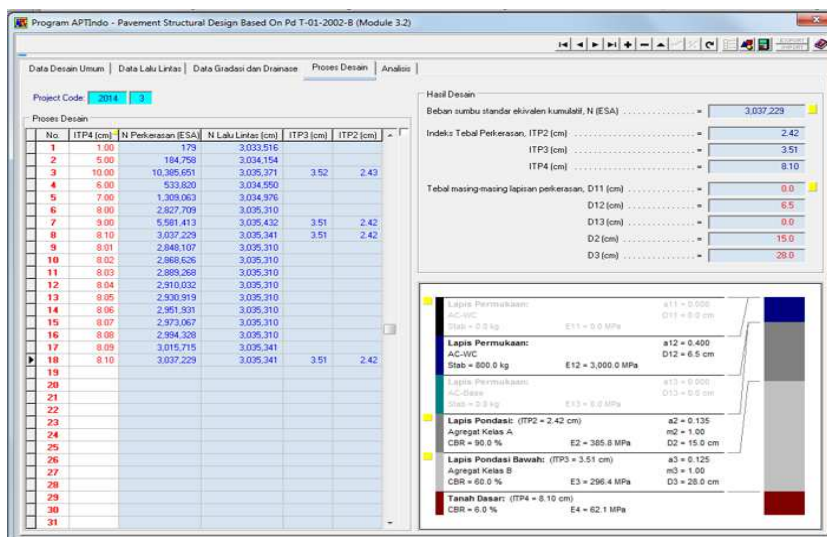
Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap struktur perkerasan yang dilewati alat uji APT. Pada struktur perkerasan uji 1 alat uji APT dijalankan selama dua bulan, didapatkan beban lalu lintas sebesar 1.517.989 ESA. Sedangkan pada struktur perkerasan uji 2 dijalankan selama empat bulan, didapatkan beban lalu lintas sebesar 3.035.341 ESA Berdasarkan Pedoman Perancangan Tebal Perkerasan Lentur, masing-masing struktur perkerasan uji membutuhkan nilai ITP sebesar 7,19 cm (N perkerasan = 1.528.449 ESA) dan 8,1 cm (N perkerasan = 3.037.229 ESA).

Nilai tebal masing-masing lapisan struktur perkerasan dengan kondisi tersebut dapat dilihat pada Tabel 5 berikut :

Tabel 5 Tebal Masing-Masing Lapisan Perkerasan

| Jenis Lapisan Perkerasan | Tebal Masing-Masing Lapisan (cm) | |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| | Struktur Perkerasan Uji 1 | Struktur Perkerasan Uji 2 |
| Maksimalkan Lapisan Pondasi Bawah : | | |
| Lapisan Permukaan | 6,5 | 6,5 |
| Lapisan Pondasi | 15 | 15 |
| Lapisan Pondasi Bawah | 21 | 28 |

Gambar 1 di bawah ini menunjukkan contoh salah satu perhitungan desain struktur perkerasan uji menggunakan *software* APT.



Gambar 1 Desain Struktur Perkerasan Uji Menggunakan Software APT

Desain yang diterapkan pada struktur perkerasan uji APT dapat dilihat pada Tabel 6 berikut

Tabel 6 Desain Struktur Perkerasan Uji APT

| Jenis Lapisan Perkerasan | Tebal Masing-Masing Lapisan (cm) | |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| | Struktur Perkerasan Uji 1 | Struktur Perkerasan Uji 2 |
| Maksimalkan Lapisan Pondasi Bawah : | | |
| Lapisan Permukaan | 10 | 10 |
| Lapisan Pondasi | 15 | 15 |
| Lapisan Pondasi Bawah | 21 | 28 |

Untuk mencari nilai dari awal terjadinya kerusakan retak struktural dan perkembangannya, terlebih dahulu ditentukan berapa nilai ITP dan YE4 yang digunakan pada model prediksi berdasarkan desain struktur perkerasan uji APT yang ada pada bab sebelumnya.

Untuk mencari nilai dari ITP yang terpasang pada struktur perkerasan uji APT tersebut, digunakan rumus berikut :

$$ITP = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (13)$$

Dimana :

- a = Koefisien kekuatan relatif
- D = Tebal minimum lapisan perkerasan, cm
- M = Koefisien drainase

Dengan menggunakan rumus di atas dan data-data yang dibutuhkan pada bab sebelumnya, didapat nilai ITP untuk masing-masing struktur perkerasan yang dapat dilihat pada Tabel 7 berikut :

Tabel 7 Nilai ITP (SNP) Masing- Masing Perkerasan

| Jenis Struktur Perkerasan Uji | ITP (cm) | SNP (Inch) |
|-------------------------------|----------|------------|
| Struktur Perkerasan Uji 1 | 8,370 | 3,30 |
| Struktur Perkerasan Uji 2 | 9,245 | 3,64 |

Untuk mendapatkan nilai YE4 , terlebih dahulu dicari nilai dari N Perkerasan pada masing-masing struktur perkerasan uji dengan menggunakan rumus berikut :

$$\log_{10}(N) = Z_R \times S_o + 9,36 \times \log_{10}(ITP + 2,54) - 3,9892 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{138071,5853}{(ITP + 2,54)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(M_R) - 3,0566 \quad (14)$$

Dimana :

- N = Perkiraan jumlah pengulangan beban sumbu standar ekivalen 8,16 ton
- Z_R = Konstanta normal
- S_o = Deviasi standar gabungan dari perkiraan lalu lintas dan kinerja struktur perkerasan
- ΔPSI = Pengurangan nilai indeks pelayanan perkerasan yang diizinkan = IP_o - IP_t
- M_R = Modulus resilien tanah dasar, MPa

Dengan menggunakan rumus di atas dan data-data pada bab sebelumnya, didapat nilai N Perkerasan untuk masing-masing struktur perkerasan yang dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8 Nilai N Capacity Masing-Masing Perkerasan

| Jenis Struktur Perkerasan Uji | N Perkerasan (ESA) |
|-------------------------------|--------------------|
| Struktur Perkerasan Uji 1 | 4.435.226 |
| Struktur Perkerasan Uji 2 | 7.801.343 |

PREDIKSI RETAK DARI STRUKTUR PERKERASAN UJI

Dengan kumulatif beban lalu lintas yang sama yang melewati suatu struktur perkerasan, umur rencana memberi pengaruh pada awal terjadinya retak struktural dan perkembangannya. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 9 di bawah ini.

Tabel 9 Pengaruh Umur Rencana Terhadap Nilai ICX

| Umur rencana (Tahun) | Struktur Perkerasan Uji 1 | | Struktur Perkerasan Uji 2 | |
|----------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|------------|
| | ICX (tahun) | ICX (ESA) | ICX (tahun) | ICX (ESA) |
| 20 | 7,28 | 545600,03 | 6,53 | 979741,74 |
| 10 | 6,15 | 921964,8266 | 4,96 | 1486479,08 |
| 5 | 4,39 | 1316328,52 | 2,85 | 1710894,36 |

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa umur rencana yang ditetapkan memberikan pengaruh pada beban lalu lintas yang menyebabkan awal kerusakan retak pada lintasan alat uji APT.

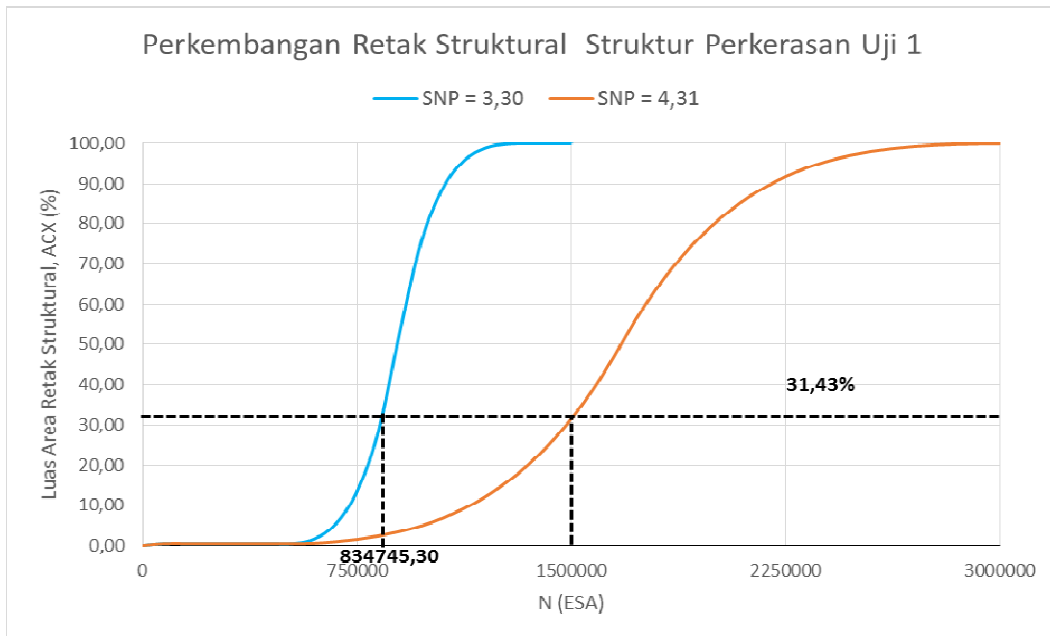
Dengan menggunakan rumus pada bab sebelumnya untuk nilai masing-masing NE4 adalah 1.500.000 ESA dan 3.000.000 ESA (sesuai dengan simulasi alat uji APT) didapat nilai ICX untuk masing-masing struktur perkerasan uji, yang dapat dilihat pada Tabel 10 berikut:

Tabel 10 Nilai ICX Masing-Masing Perkerasan

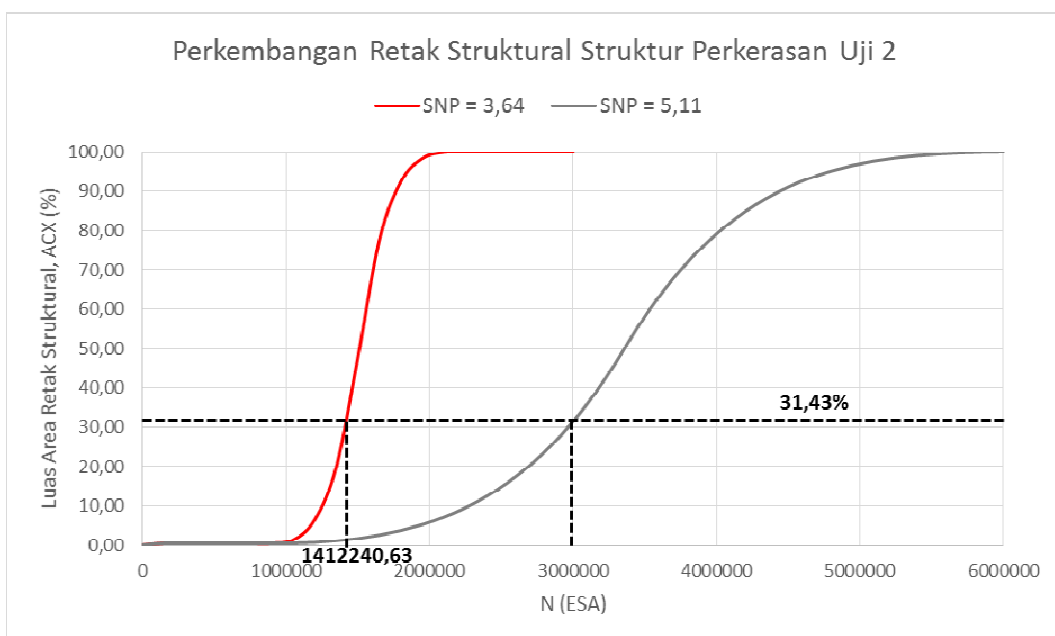
| Jenis Struktur Perkerasan Uji | YE4 = 75.000 ESA | | YE4 = 150.000 ESA | |
|-------------------------------|------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | ICX (tahun) | ICX (ESA) | ICX (tahun) | ICX (ESA) |
| Struktur Perkerasan Uji 1 | 7,28 | 545600,03 | - | - |
| Struktur Perkerasan Uji 2 | - | - | 6,15 | 979741,7 |

Diketahui nilai YE4 untuk struktur perkerasan uji 1 adalah 75.000 ESA/Tahun, sedangkan nilai YE4 struktur perkerasan uji 2 adalah 150.000 ESA/Tahundengan asumsi umur rencana sesuai Manual Desain Perkerasan Jalan Bina Marga (2013) yaitu 20 tahun. Luas area yang mengalami retak struktural pada lintasan uji APT adalah sebesar 31,43% dari luas struktur perkerasan uji. Nilai 31,43% didapat dari hasil perbandingan antara luas lintasan uji APT terhadap luas struktur perkerasan uji. Pada kondisi ini, didapat nilai beban lalu lintas pada struktur perkerasan uji 1 sebesar 834.745,30 ESA dan pada struktur perkerasan uji 2 sebesar 1.412.240,63 ESA.

Agar kerusakan terjadi pada beban lalu lintas sebesar 1.500.000 ESA pada struktur perkerasan uji 1 dan 3.000.000 ESA pada struktur perkerasan uji 2 (kerusakan pada 31,43%), diperlukan nilai ITP untuk masing-masing struktur perkerasan uji sebesar 4,31 dan 5,11. Perkembangan total luas area yang mengalami kerusakan retak untuk masing-masing struktur perkerasan uji dengan nilai ITP yang bervariasi dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 1 Grafik Perkembangan Retak Struktural Struktur Perkerasan Uji 1



Gambar 2 Grafik Perkembangan Retak Struktural Struktur Perkerasan Uji 2

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa pada struktur perkerasan uji APT yang mengikuti desain sesuai pedoman Bina Marga masih belum mampu memikul beban lalu lintas sesuai umur rencana (*underdesign*).

Pengaruh umur rencana terhadap nilai ITP suatu struktur perkerasan pada total beban lalu lintas yang sama dapat dilihat pada tabel 11 berikut :

Tabel 11 Pengaruh Umur Rencana Terhadap Nilai ITP

| Struktur Perkerasan Uji 1 (N = 1,5 mESA) | | Struktur Perkerasan Uji 2 (N = 3,0 mESA) | |
|--|----------|--|----------|
| YE4 (mESA) | ITP (cm) | YE4 (mESA) | ITP (cm) |
| 0,075 | 4,31 | 0,075 | 5,11 |
| 0,15 | 3,75 | 0,15 | 4,58 |
| 0,3 | 3,18 | 0,3 | 4,16 |

KESIMPULAN

Hasil analisis model HDM-4 dengan menggunakan program komputer APT mengindikasikan bahwa luas kerusakan retak struktural ditentukan tidak hanya oleh repetisi beban sumbu standar tahunan , tetapi juga dipengaruhi oleh umur rencana. Untuk beban lalu lintas tahunan yang lebih tinggi pada umur rencana atau total repetisi sumbu standar yang sama, diperlukan nilai ITP yang lebih rendah. Hal ini menjelaskan mengapa struktur perkerasan di jalan perkotaan yang memikul beban lalu lintas yang lebih rendah harus didesain lebih tebal.

Menurut model HDM-4, struktur perkerasan yang didesain berdasarkan metoda Pd T-01-2002-B mengalami awal kerusakan retak struktural pada perkerasan uji 1 pada beban lalu lintas sebesar 545.600,03 ESA, sedangkan pada perkerasan uji 2 terjadi pada beban lalu lintas sebesar 979.741,74 ESA. Perkembangan luas retak struktural mencapai 31,43% yang merupakan kerusakan maksimum pada lajur lintasan roda uji terjadi pada repetisi beban lalu lintas yang melewati struktur perkerasan uji 1 sebesar 834.745,30 ESA dan pada struktur perkerasan uji 2 sebesar 1.412.240,63 ESA. Dapat disimpulkan bahwa model HDM-4 memperkirakan hasil desain struktur perkerasan berdasarkan metoda Pd T-01-2002-B yang tidak aman. Agar struktur perkerasan uji tersebut mampu memikul beban lalu lintas sesuai umur rencana, nilai ITP perlu diperbesar sekitar 30-40%.

Hasil analisis ini masih bersifat sementara. Setelah pengujian APT selesai dilakukan, proses validasi model HDM-4 atau pedoman desain Bina Marga dapat lebih dipertajam lagi dengan memperhitungkan faktor probabilitas.

DAFTAR PUSTAKA

Ferreira, A., Micaelo, R and Souza, R. 2012. *Cracking Models for Use in Pavement Maintenance Management*. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, pp. 429-439.

Kementrian Pekerjaan Umum, Pedoman Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil: Perancangan Tebal Perkerasan Lentur. Pd T-01-2002-B.

Kosasih, D. 2014. Software APT. Institut Teknologi Bandung. Bandung

Morosiuk, G., Toole, T., Mahmud, S and Dachlan, T. 2000. *Modelling The Deterioration of Bituminous Pavements In Indonesia Within A HDM-4 Framework*.

Odoki, J.B. 1997. *Implementation of The Road Deterioration Models in HDM-4 Part 1 Bituminous Pavements*. Overseas Development Administration Asian Development Bank Swedish National Road Administration The World Bank.

Solminihac, Hernan de., Hidalgo, P., Salgado, M and Altamira, A. 2003. *Calibration of structural cracking models for asphalt pavements: HDM-4 case*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences Vol. 10, June 2003, pp. 193-201.

Suswandi, A., Sartono, W dan Hadiyatmo, H.C. 2008. *Evaluasi Tingkat Kerusakan Jalan Dengan Metode Pavement Condition Index (PCI) Untuk Menunjang Pengambilan Keputusan (Studi Kasus: Jalan Lingkar Selatan, Yogyakarta)*. Forum Teknik Sipil No. XVIII/3-September 2008.