

Evaluasi umur sisa perkerasan kaku pada ruas jalan tol Solo-Ngawi

Mohammad Faizal Kelan Pambudi^{1,*}, Sri Sunarjono¹, Senja Rum Harnaeni¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Sekolah Pascasarjana, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

*Corresponding authors: mfaisalkelan.p@gmail.com

Submitted: 6 January 2024, Revised: 14 June 2024, Accepted: 18 June 2024

ABSTRACT: Roads are the main infrastructure that aims to accelerate the growth of a region which results in the opening of social, economic, and cultural relations between regions. A good and stable road will affect the smooth flow of traffic. One of the toll roads that is indicated to have decreased pavement function due to various factors affecting damage is the Solo-Ngawi toll road. The evaluation of the remaining life of rigid pavement on the Solo-Ngawi toll road section aims to determine how much the remaining life value of rigid pavement on the toll road section and is used as a reference in determining the maintenance method. This research uses quantitative methods based on secondary data with reference analysis based on American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1993. It can be known based on the results of the evaluation analysis based on the 1993 AASHTO book, the CESAL value of the plan from the results of the analysis obtained a value of 22,913,047 ESAL, while for the Actual CESAL Based on each column, a value of 8,239,688 ESAL was obtained for the Solo-Ngawi direction and 4,270,023 ESAL for the Ngawi-Solo direction. From the two results above, it is stated that the remaining age for each route was obtained 64.04% for the Solo-Ngawi Direction and 81.37% for the Ngawi-Solo Direction. The benefits of this research can be known related to how old the remaining pavement of the Solo-Ngawi Toll Road section is so that it is expected to contribute as a reference for toll road managers to increase the road service period even more for vehicle users who choose the Solo-Ngawi toll road.

KEYWORDS: AASHTO 1993; LHRT; toll roads; VDF.

ABSTRAK: Jalan merupakan prasarana pokok yang bertujuan untuk mempercepat pertumbuhan suatu daerah yang mengakibatkan terbukanya hubungan sosial, ekonomi, dan budaya antar daerah. Jalan yang baik dan stabil akan berpengaruh terhadap kelancaran arus lalu lintas. Salah satu jalan tol yang terindikasi mengalami penurunan fungsi perkerasan yang diakibatkan berbagai faktor pengaruh kerusakan adalah ruas jalan tol Solo-Ngawi. Evaluasi umur sisa perkerasan kaku pada ruas jalan tol Solo-Ngawi bertujuan untuk mengetahui berapa nilai umur sisa perkerasan kaku pada ruas jalan tol tersebut dan digunakan sebagai referensi dalam penentuan metode pemeliharannya. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif berdasarkan data- data sekunder dengan analisa acuan berdasarkan *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1993*. Dapat diketahui berdasarkan hasil analisa evaluasi dengan berdasarkan buku AASHTO 1993, nilai CESAL rencana dari hasil analisa didapatkan nilai sebesar 22,913,047 ESAL, Sedangkan untuk CESAL Aktual Berdasarkan masing-masing lajur didapatkan nilai 8,239,688 ESAL untuk arah Solo-Ngawi dan 4,270,023 ESAL untuk arah Ngawi-Solo. Dari kedua hasil diatas dinyatakan bahwa umur sisa untuk masing-masing jalur didapatkan 64.04 % untuk Arah Solo-Ngawi dan 81.37 % untuk Arah Ngawi-Solo. Manfaat penelitian ini dapat diketahui terkait berapa umur sisa perkerasan dari ruas Tol Solo-Ngawi sehingga diharapkan dapat berkontribusi sebagai acuan pengelola jalan tol untuk peningkatan masa layan jalan lebih banyak lagi bagi pengguna kendaraan yang memilih jalan tol Solo-Ngawi.

KATA KUNCI: AASHTO 1993; LHRT; jalan tol; VDF.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Jalan menjadi salah satu fokus permasalahan transportasi agar jalan tidak mudah rusak (Rahadian, 2018). Seiring berjalannya waktu, lapisan permukaan jalan semakin berkurang akibat meningkatnya beban lalu lintas, cuaca, kondisi lingkungan dan juga buruknya sistem drainase. Menurunnya tingkat pelayanan jalan ditandai dengan adanya kerusakan pada lapisan permukaan jalan itu sendiri, jenis kerusakan pada jalan tersebut dapat berbeda-beda. Kerusakan permukaan jalan seiring berjalannya waktu mempengaruhi struktur lapisan di bawahnya, sehingga

mempengaruhi area sekitar kerusakan awal (Rahadian, 2018).

Jalan tol Solo-Ngawi mengalami penurunan fungsi perkerasan karena sering dilalui kendaraan berat, menyebabkan kerusakan perkerasan kaku akibat pertumbuhan lalu lintas yang melebihi rencana. Menurut Fahrurrozi et al. (2020) menjelaskan evaluasi terhadap kondisi struktur suatu perkerasan menjadi tahapan penting dalam menentukan program pemeliharaan. Menurut prediksi kerusakan akibat beban dan kualitas material dapat juga dilakukan dengan menggunakan metode mekanistik-empiris,

dimana pendekatannya dengan teroris dan karakteristik dari material itu sendiri. Salah satu perangkat lunak yang dapat menganalisis dengan metode mekanistik-empiris adalah Program *KENPAVE*. *KENPAVE* adalah sebuah aplikasi pemrograman komputer yang dikembangkan oleh Dr. Yang h. huang.p (1 Orang) dari Emeritus Teknik Sipil Universitas Kentucky memiliki fungsi mengetahui tegangan dan regangan perkerasan jalan yang dapat memberikan potensi kerusakan selama kurun waktu tertentu (Aji & Susilo, 2023).

Salah satu metode yang juga digunakan untuk mengetahui kerusakan dan perlindungan jalan adalah metode *Integrated Road Management System* (IRMS). Metode IRMS merupakan sistem perencanaan jalan nasional dan regional dengan sistem perangkat lunak untuk membantu dalam pengumpulan data, pemeliharaan dan perencanaan jalan. IRMS sendiri mempunyai bagian-bagian sistem database, sistem perancangan dan pemeliharaan, pemrograman dan sistem perawatan jalan, sehingga sangat baik digunakan untuk mengetahui sisa umur perkerasan jalan (Hamdi et al., 2022)

Metode non destruktif merupakan metode yang melakukan penilaian struktur dengan cara mengumpulkan data struktur perkerasan eksisting tanpa merusak kondisi struktur perkerasan tersebut. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan metode AASHTO 1993 (Ridwan et al., 2012). Kajian penelitian mengenai umur sisa perkerasan memang sudah banyak dilakukan, akan tetapi untuk penelitian Perkerasan kaku khususnya pada studi kasus ruas jalan tol Solo-Ngawi belum pernah dilakukan sebelumnya.

Hendito et al. (2021) menyatakan dalam penelitiannya dari hasil perhitungan IKP, didapatkan nilai IKP rata-rata 96.32 atau termasuk sangat baik. Metode IKP ini memiliki tingkat jenis penanganan tiap nilai IKP, jenis penanganan dengan nilai rata-rata 96.32 ini adalah pemeliharaan rutin. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama mencari nilai sisa umur perkerasan dan juga alternatif penanganannya sementara perbedaannya yaitu pada metoda yang digunakan dalam penelitian ini peneliti menggunakan metode Indeks Kondisi Perkerasan (IKP).

Ahmad (2022) dalam penelitiannya menganalisa kondisi fungsional suatu jalan dengan menggunakan metode *Present Serviceability Index* (PSI) dan metode *Road Condition Index* (RCI), dapat disimpulkan korelasi antara PSI dan RCI saling berkesinambungan dan tidak berdiri sendiri, artinya jika kondisi permukaan jalan tersebut tergolong baik maka umumnya dapat menghasilkan kondisi pelayanan yang baik pula. Dalam analisisnya mengenai umur sisa perkerasan jalan tersebut ternyata terjadi percepatan umur rencana selama 3 tahun dari umur jalan yang telah direncanakan. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama mencari sisa umur dari perkerasan jalan, sementara

perbedaannya yaitu pada penelitian yang dilakukan penulis sebelumnya pada metode yang digunakan yaitu menggunakan metode PSI dan metode RCI dan dalam penelitian ini yang dicari adalah kondisi fungsional jalannya.

Bagaskara et al. (2021) menyatakan berdasarkan hasil analisis sisa umur rencana jalan, pada ruas jalan rajawali dari arah segmen (Simpang 4 Tingang-Rajawali) mempunyai sisa umur yaitu 66.95% dan dari jalan Rajawali dari arah segmen (Simpang 4 Badak-Rajawali) kerusakan jalan pada kendaraan, didapatkan bahwa truk 2 sumbu yang memiliki beban >20 ton mengalami overloading karena roda bagian belakang kelebihan 4.8630 sehingga menjadi tidak aman, truk 3 sumbu yang memiliki beban >30 ton juga mengalami overloading karena roda bagian belakang kelebihan 5.3810 sehingga menjadi tidak aman, dimana keduanya sama dengan truk yang memiliki 3-4 as tunggal yang lewat. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama menganalisa sisa umur perkerasan jalan sementara perbedaannya yaitu pada penelitian yang dilakukan penulis sebelumnya Analisa dilakukan berdasarkan pertumbuhan lalu lintas.

Dwiputra et al. (2021) Di dalam penelitiannya memberikan pernyataan Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai repetisi beban dan memprediksi sisa umur perkerasan lentur agar dapat menjadi pedoman dalam melakukan penanganan kerusakan jalan. Metode yang digunakan adalah metode mekanistik- empirik, menggunakan program *KENPAVE*. Studi ini menunjukkan bahwa perkerasan jalan di Ruas Jalan Prof. Dr. Wiryono Prodjodikoro mampu mengakomodasi beban repetisi sebesar 13,444,693 ESAL sampai terjadi kerusakan permanent deformation pada tahun ke-8, sebesar 38,286,385 ESAL sampai terjadi kerusakan rutting pada tahun ke-17, dan sebesar 147,165,814 ESAL sampai terjadi kerusakan *fatigue cracking* pada tahun ke-36. Sebelum tahun ke-8, perkerasan harus diperbaiki agar tidak mengalami kerusakan yang lebih parah. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama menganalisa sisa umur perkerasan jalan sementara perbedaannya yaitu pada penelitian yang dilakukan penulis sebelumnya Analisa menggunakan program *KENPAVE*.

Ahmed et al. (2021) Kajian ini mengevaluasi umur layanan perkerasan menggunakan panduan desain perkerasan AASHTO 1972 dan panduan desain perkerasan mekanik-empiris (M-E). Masa pakai di sini disebut sebagai durasi dari rehabilitasi terakhir yang diselesaikan hingga perawatan pemeliharaan berikutnya. Tujuannya bukan untuk menentukan metode mana yang lebih baik, tetapi lebih untuk memahami bagaimana perkiraan masa pakai mereka berbeda dan faktor yang berkontribusi pada perbedaan mereka. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama meneliti mengenai umur sisa perkerasan jalan sementara perbedaan

dengan penelitian yang diusulkan penelitian tersebut menggunakan metode AASHTO 1972.

Pada penelitian ini memberikan pendapat perkiraan regangan pada struktur lapis perkerasan lentur memerlukan ketelitian yang tinggi oleh karena itu digunakan suatu software seperti *KENPAVE* yang menghasilkan regangan tarik horizontal sebesar $8.802E-05$ dan regangan tekan vertikal sebesar $2.642E-04$. Dengan menerapkan persamaan itu diperoleh pengulangan beban ijin saat mencapai retak leleh (N_f) adalah 16,071,516 ESAL dan deformasi permanen (rutting) adalah 14,703,867 ESAL serta diprediksi sisa umur layan perkerasan dengan menggunakan persamaan AASTHO 1993 dengan mempertimbangkan faktor Pengganda Lalu Lintas (TM 1.8, TM 1.9 dan TM 2.0) diperoleh sisa umur pakai akibat kelelahan sebesar 5.51% pada tahun ke-13 (TM 1.8), 7.95% pada tahun ke-12 (TM 1.9) dan 3.11% (TM 2.0) pada tahun ke-12, juga sisa masa pakai akibat roda gigi sebesar 4.69% pada tahun ke-12 (TM 1.8), 7.79% pada tahun ke-11 (TM 1.9), dan 2.94 pada tahun tanggal 11 (TM 2.0) (Usman et al., 2018). Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama menggunakan metode AAHTO 1993 sementara perbedaan pada penelitian yang diusulkan penelitian tersebut digunakan pada perkerasan lentur.

Putra & Robby (2021) mengatakan berdasarkan hasil analisis sisa umur pada ruas jalan Yos Sudarso dari arah Bundaran Besar mempunyai sisa umur yaitu 48.74% dari arah Lintas mempunyai sisa umur yaitu 52.54%. Pada ruas jalan Ahmad Yani dari arah Jembatan Kahayan yaitu 66.95% dari arah Pasar Besar yaitu 71.86%. Pada ruas jalan RTA Milono dari arah Bundaran Besar yaitu 69.04% dari arah Kereng Bangkirai yaitu 67.54%. Pada ruas jalan Tjilik Riwut dari arah Bundaran Besar yaitu 57.23% dari arah Tangkiling yaitu 57.98%. Untuk derajat kerusakan jalan pada truk 2 sumbu lebih dari 20 ton mengalami overloading karena roda bagian belakang kelebihan 4.8630 sehingga menjadi tidak aman. Sedangkan, pada truk 3 sumbu lebih dari 30 ton mengalami overloading karena roda bagian belakang kelebihan 5.3810 sehingga menjadi tidak aman. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama menganalisa sisa umur perkerasan jalan sementara perbedaannya yaitu pada penelitian ini analisisnya berdasarkan pertumbuhan lalu lintas di Kota Palangkaraya.

Ratnasari & Suparma (2021) dalam studinya, mengatakan Hasil respons struktur digunakan untuk menghitung besarnya kerusakan-kerusakan cracking dan rutting, yang selanjutnya digunakan untuk memprediksi nilai *international roughness index*. Nilai *international roughness index* hasil prediksi kemudian diuji statistika dengan hasil pengukuran lapangan selama 4 tahun terakhir. Selanjutnya, nilai *present serviceability index* dianalisis berdasarkan hasil prediksi nilai *international roughness index*. Studi ini

menunjukkan bahwa perkerasan telah mencapai *terminal serviceability* pada tahun ke-5.2 dan memerlukan penguatan. Hasil prediksi nilai *present serviceability index* dengan penanganan *overlay* setebal 10 cm pada tahun ke-5.2 menunjukkan bahwa terminal serviceability tercapai pada tahun ke-9.5, sehingga menambah umur layan jalan sebesar 4.3 tahun. Persamaan penelitian ini dengan penelitian yang diusulkan adalah sama-sama mencari sisa umur perkerasan jalan sementara perbedaannya yaitu pada penelitian yang dilakukan penulis sebelumnya metode analisa yang digunakan adalah metode PSI.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisa umur sisa perkerasan kaku pada ruas jalan tol Solo-Ngawi dengan mencari nilai *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL) rencana dan *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL) aktual berdasarkan parameter lalu lintas dan parameter perkerasan. Dari penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi kepada pengelola tol mencari pemeliharaan yang tepat untuk meningkatkan masa layan jalan tol.

2 METODOLOGI

Jalan tol Solo-Ngawi merupakan bagian dari jalan tol transjawa yang sudah beroperasi mulai tahun 2018 (Gambar 1). Seiring berjalannya waktu ruas jalan tol Solo-Ngawi terindikasi mengalami penurunan masa layan, maka dari itu diperlukan penelitian lebih lanjut terkait umur sisa perkerasan kaku.

2.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah deskriptif kuantitatif yang bersifat eksploratif, yakni bertujuan untuk menggambarkan keadaan atau status fenomena (Sugiyono, 2016). Penelitian dengan pendekatan kuantitatif karena penelitian bertumpu pada jenis data kuantitatif atau teknik statistik inferensial. Penelitian dilakukan pada ruas Jalan Tol Solo-Ngawi.

2.2 Pengumpulan Data

Berdasarkan sumbernya, penelitian ini menggunakan data sekunder. Data sekunder adalah data yang diperoleh secara tidak langsung atau melalui media perantara (Sugiyono, 2016). Data sekunder pada penelitian ini meliputi:

1. Data LHR pada ruas jalan tol Solo-Ngawi.
2. Data *shop drawing*.
3. Data curah hujan.
4. Data spesifikasi teknis jalan tol Solo-Ngawi.
5. Data teknis drainase jalan tol Solo-Ngawi.

Data diatas nantinya digunakan untuk menghitung nilai CESAL Rencana dan CESAL Aktual. Karena penelitian dilakukan pada tahun 2023 maka batasan masalah data LHRT yang digunakan dari awal operasional 2019 hingga tahun 2022.



Gambar 1. Peta Jaringan Ruas Jalan Tol Solo – Ngawi (PT. Jasamarga Solo Ngawi, 2020)

2.3 Tahap Penelitian

2.3.1 Perumusan tujuan dan metode penelitian

Tahap ini dilakukan identifikasi masalah penelitian dan studi pustaka mengenai metode AASHTO 1993 dalam mengevaluasi umur sisa perkerasan jalan pada ruas jalan tol Solo-Ngawi.

2.3.2 Pengumpulan data penelitian

Tahap ini merupakan pengumpulan sumber data penelitian yang terdiri dari data sekunder terkait metode AASHTO 1993 pada ruas jalan tol Solo-Ngawi.

2.3.3 Analisis Data

Menghitung nilai CESAL aktual dengan menggunakan persamaan:

$$W_{18} = \sum_{N_1}^{N_N} LHR_j \times VDF_j \times D_D \times D_L \times 365 \dots \dots \dots (1)$$

dimana W_{18} adalah traffic design pada lajur lalu lintas, LHR_j adalah jumlah lalu lintas harian rata-rata 2 arah untuk jenis kendaraan j, VDF_j adalah vehicle damage factor untuk jenis kendaraan j, D_D adalah faktor distribusi arah, D_L adalah factor distribusi lajur, dan 365 adalah Jumlah hari dalam 1 tahun.

Menghitung nilai CESAL desain dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} \log_{10}(W_{18}) &= Z_r \times S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 1) - 0.06 \\ &+ \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_i) \times \\ &\log_{10} \frac{S'c \times Cd \times [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 \times J \times [D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_C \cdot K)^{0.25}}]} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

dimana W_{18} adalah ESAL yang diperkirakan, ZR adalah standar deviasi normal, S_0 adalah standar deviasi, D adalah tebal pelat beton (Inches), ΔPSI adalah perbedaan serviceability index di awal dan akhir umur rencana, P_0 adalah Initial serviceability, P_t adalah terminal serviceability index, $S'c$ adalah modulus of rupture sesuai spesifikasi pekerjaan (Psi), Cd adalah drainage coefficient, J adalah load transfer coefficient, E_c adalah modulus elastisitas (Psi), dan K adalah modulus reaksi tanah dasar (pci).

Menghitung nilai umur sisa perkerasan dengan menggunakan persamaan:

$$RL = 100 \left[- \left(\frac{NP}{N_{1.5}} \right) \right] \dots \dots \dots \text{Persamaan (3)}$$

dimana RL adalah remaining life (%), NP adalah total lalu lintas yang telah melewati perkerasan (18-kip ESAL), dan $N_{1.5}$ adalah total lalu lintas pada kondisi perkerasan berakhir (failure) (18-kip ESAL).

2.3.4 Kesimpulan dan rekomendasi

Tahap ini merupakan kesimpulan hasil penelitian yang sesuai dengan rumusan dan tujuan penelitian, serta saran yang membangun untuk rekomendasi terkait kebijakan dalam pengambilan keputusan metode yang paling menguntungkan bagi perusahaan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk perhitungan umur sisa perkerasan kaku pada penelitian ini akan dinyatakan dalam equivalent single axle load (ESAL) yang masih dapat dipertahankan sebagai fungsi dari kapasitas struktur perkerasan. Dalam menentukan umur sisa perkerasan

pemeliharaan dapat dilakukan dengan 2 (dua) cara, yaitu sebagai berikut:

1. Mencari Nilai CESAL rencana
2. Mencari Nilai CESAL aktual

Untuk menentukan nilai-nilai diatas didukung oleh data-data utama yang didapatkan dari pihak Badan Usaha Jalan Tol (BUJT)/pengelola tol untuk ruas Solo-Ngawi. Data utama yang dimaksud ialah:

1. Data spesifikasi teknis jalan tol Solo –Ngawi.
2. Data Lalu Lintas Harian Aktual (LHR) ruas jalan tol Solo-Ngawi.

3.1 Analisis Nilai CESAL Rencana

Dalam menghitung umur sisa perkerasan kaku pada jalan dibutuhkan suatu perbandingan antara nilai Nilai CESAL yang telah direncanakan dengan nilai CESAL yang telah melewati suatu pengkerasan atau yang biasa disebut sebagai CESAL aktual. Untuk perhitungan CESAL rencana pada penelitian ini digunakan suatu persamaan yang tertera pada AASHTO 1993.

3.1.1 Nilai reliabilitas (R)

Reliabilitas adalah probabilitas bahwa Perkerasan yang direncanakan akan tetap memuaskan selama masa layannya. Penetapan nilai reliabilitas didasarkan atas korelasi antara penetapan jenis klasifikasi jalan serta tipe jalannya (Apriyatno, 2015). Karena klasifikasi jalan merupakan jalan tol serta tipe jalannya adalah rural karena menghubungkan antar wilayah bukan diarea perkotaan. Untuk nilai realibilitas tol Solo-Ngawi diambil nilai tengah sebesar 90. Seperti dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan reliabilitas

Klasifikasi Jalan	Reliabilitas (%)	
	Urban	Rural
Jalan Tol	85-99.9	80-99.9
Arteri	80-99.9	75-95
Kolektor	80-95	75-95
Lokal	50-80	50-80

3.1.2 Nilai standar normal deviasi (Zr)

Setelah didapatkan nilai reliabilitas maka selanjutnya dicari nilai standar normal deviasi yang dimana sangat berhubungan dengan nilai reliabilitas. Nilai standar normal deviasi (Zr) dapat ditentukan melalui Tabel 2.

Dari hasil nilai Reliabilitas pada ruas jalan tol Solo-Ngawi didapatkan nilai standar normal deviasi yaitu -1.282.

Tabel 2. Hubungan reliabilitas dan standar normal deviasi

R (%)	Zr
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Sumber: AASHTO, 1993

3.1.3 Nilai standar deviasi keseluruhan

Untuk mencari nilai standar deviasi keseluruhan menurut buku AASHTO 1993 halaman I-62 rentang nilainya untuk perkerasan kaku antara 0.30-0.40. Nilai S₀ pada penelitian ini yaitu diambil nilai tengah 0.35 berdasarkan nilai S₀ yang disarankan oleh AASHTO road test untuk perkerasan kaku.

3.1.4 Nilai tingkat pelayanan awal dan akhir

Untuk mencari nilai tingkat pelayanan awal, berdasarkan rekomendasi AASHTO road test bahwa nilai P₀ adalah 4.5, sedangkan untuk menentukan nilai tingkat pelayanan akhir (P_t) berdasarkan Tabel 3.

Tabel 3. Index tingkat pelayanan

Percent of people stating unacceptable	P _t
12	3.0
55	2.5
85	2.0

Sumber: AASHTO, 1993

Dari Tabel 3 untuk jalan raya utama (*major highways*) yaitu nilainya 2.5 atau 3.0. Untuk penelitian ini digunakan angka 3.0 dikarenakan jalan tol Solo-Ngawi masih belum lama beroperasi.

3.1.5 Nilai toleransi pada akhir umur rencana (ΔPSI)

Angka PSI merupakan angka yang masih dapat diterima pada akhir umur rencana sebelum dilakukan rehabilitasi, pelapisan ulang (*overlay*), atau diperlukan rekonstruksi. Angka 2.5 atau lebih besar adalah angka yang disarankan untuk desain pada jalan dengan lalu lintas tinggi dan 2.0 untuk jalan dengan lalu lintas yang lebih rendah (Prasetyo et al., 2023). Untuk mencari PSI dapat digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 4.5 - 3.0 = 1.5$$

Dari perhitungan di atas bahwa nilai toleransi pada akhir umur rencana (PSI) adalah sebesar 1.5.

3.1.6 Nilai modulus reaksi tanah dasar (k)

Untuk mencari nilai modulus reaksi tanah dasar (k) didasarkan pada nilai CBR rencana pada ruas Jalan tol Solo-Ngawi, pada ruas jalan tol Solo-Ngawi nilai CBR rencana sebesar 6%. Maka untuk mencari nilai k dapat digunakan dengan rumus seperti dibawah ini:

$$k = \frac{M_R}{19.4}, \text{ dimana } MR = 1500 \times CBR$$

Maka perhitungan modulus reaksi tanah dasar (k) untuk CBR-6 berdasarkan adalah sebagai berikut:

$$k = \frac{M_R}{19.4} = \frac{1500 \times CBR}{19.4} = \frac{1500 \times 6}{19.4} = 464 \text{ pci}$$

Nilai reaksi tanah dasar (k) yang diperoleh kemudian dikoreksi terhadap kehilangann daya dukung (*loss of support*) akibat *wet lean concrete* yang berada diatas tanah dasar yang nantinya berfungsi sebagai lantai kerja dan struktur perkerasan (Suryadi & Susilo, 2017). Koreksi nilai k dilakukan dengan menghubungkan nilai *loss of support* dan nilai reaksi tanah dasar (k) dengan menggunakan Tabel 4 nilai *loss of support* berdasarkan tipe material.

Tabel 4. Nilai *loss of support*

No	Tipe Material	LS
1	Cement treated granular base (E = 1,000,000 – 2,000,000 psi)	0-1
2	Cement aggregate mixture (E = 500,000 – 1,000,00 psi)	0-1
3	Asphalt treated base (E = 350,000 – 1,000,000 psi)	0-1
4	Bituminous stabilized mixtures (E = 40,000 – 300,000 psi)	0-1
5	Lime stabilized (E = 20,000 – 70,000 psi)	1-3
6	Unbound granular materials (E = 15,000 – 45,000 psi)	1-3
7	Fine grained/natural subgrade materials (E = 3,000 – 40,000 psi)	2-3

Sumber: AASHTO, 1993

Berdasarkan data spesifikasi teknis jalan tol Solo-Ngawi untuk material lapis *subgrade* termasuk pada *fine grained* maka nilai *loss of support* sebesar 3.0 dikarenakan jalan tol Solo-Ngawi walaupun dikategorikan jalan tol baru beroperasi tapi sudah memiliki masalah pada perkerasan kakunya yang diakibatkan beban lalu lintas melebihi prediksi atau rencana. Setelah didapatkan nilai *loss of support* maka nilai koreksi *effective modulus of subgrade reaction* antara hubungan K dan LS (Kardinata & Darmadi, 2020), maka didapatkan nilai K Koreksi sebesar 30 pci.

3.1.7 Nilai modulus elastisitas beton (Ec)

Berdasarkan penelitiannya (Mubarak et al., 2020) dalam menghitung modulus elastisitas beton menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_c = 57,000 \sqrt{F_c'}, \text{ dimana } F_c' = 400 \text{ kg/cm}^2 \text{ dan } 1 \text{ kg/cm}^2 = 14.22 \text{ psi}$$

Dapat diketahui berdasarkan spesifikasi teknis perkerasan kaku pada ruas jalan tol Solo-Ngawi bahwa nilai *Fc'* nya ada 45 yang dimana dapat kita ketahui setara dengan 400 kg/cm². Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa beton pada saat selama umur rencana 10-20 tahun akan mengalami penurunan kuat tekan beton 20%-25% dari kuat tekan beton semula (AASHTO, 1993). Maka pada penelitian ini penurunan beton diasumsikan sebesar 20% dengan argumentasi bahwa masa operasional jalan tol Solo- Ngawi belum terlalu lama, sehingga kuat tekan beton aktual menjadi:

$$F_c' = 320 \text{ kg/cm}^2 \times 14.22 \text{ psi} = 4,550.2 \text{ psi}$$

Sehingga nilai modulus elastisitas beton berdasarkan dapat dicari:

$$E_c = 57,000 \sqrt{F_c'} = 57,000 \sqrt{4,550.2} = 3,844,944.707 \text{ psi}$$

3.1.8 Nilai modulus keruntuhan beton (Sc)

Modulus keruntuhan beton (Sc) merupakan ukuran terhadap *flexural strength* yang ditentukan berdasarkan tegangan tarik atau kuat tarik beton pada saat beton mulai retak. Berdasarkan spesifikasi teknis jalan tol Solo-Ngawi sebesar 45, maka nilai Sc ditetapkan sebesar 45 kg/cm² = 640 psi.

3.1.9 Nilai koefisien transfer beban (J)

Untuk mencari nilai koefisien transfer beban (J) dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan data Tabel 5 diatas dan spesifikasi teknis jalan tol Solo-Ngawi dimana tipe perkerasan kakunya adalah pelat beton semen *Portland* terikat maka nilai J yaitu antara 2.5-3.1. Dari Tabel 5 tersebut pada penelitian ini ditetapkan bahwa nilai J sebesar 2.5.

3.1.10 Tebal pelat beton eksisting

Untuk tebal pelat beton eksisting pada ruas jalan tol Solo-Ngawi ini sebesar 29 cm atau untuk lapisan PCCP (*Portland Cement Concrete Pavement*) sebesar 11.42 inci.

Tabel 5. Nilai koefisien transfer beban

Shoulder	Asphalt		Tied PCC	
	Yes	No	Yes	No
Load transfer devices				
Pavement type				
Plain jointed & jointed reinforced	3.2	3.8-4.4	2.5-3.1	3.6-4.2
CRCP	2.9-3.2	N/A	2.3-2.9	N/A

Sumber: AASHTO, 1993

3.1.11 Nilai koefisien drainase (Cd)

Dalam mencari nilai koefisien drainase perlu dicari persentase hari efektif hujan dalam setahun melalui data curah hujan rata-rata curah hari hujan kota Surakarta pada tahun 2021 sebanyak 17 hari/bulan, maka data tersebut dapat dikonversi menjadi jumlah hujan dalam jam/hari dengan cara sebagai berikut:

$$17 \text{ hari/bulan} \times 12 \text{ bulan} = 204 \text{ hari/tahun}$$

$$204 \text{ hari/tahun} \times 24 \text{ jam} = 4,896 \text{ jam/tahun}$$

$$4,896 \text{ jam/tahun} = (4,896 \text{ jam}) / (365 \text{ hari}) = 14 \text{ jam/hari}$$

Selanjutnya kita mencari nilai W_L (faktor air hujan yang masuk ke pondasi) berdasarkan Tabel 6.

Tabel 6. Koefisien pengaliran (Cd)

No	Kondisi Permukaan Tanah	Cd
1	Jalan beton dan jalan aspal	0.70-0.95
2	Bahu Jalan:	
	Tanah berbutir halus	0.40-0.65
	Tanah berbutir kasar	0.10-0.20
	Batuan massif keras	0.70-0.85
	Batuan massif lunak	0.60-0.75

Sumber: AASHTO, 1993

Dari Tabel 6 diatas dapat disimpulkan bahwa dengan kondisi permukaan jalan tol yang berupa pekerasan kaku maka nilai koefisien pengaliran yaitu antara 0.70-0.95. Pada penelitian ini ditentukan bahwa dengan kondisi jalan tol yang masih baru beroperasi nilai koefisien pengaliran sebesar 0.80.

Maka setelah nilai koefisien pengaliran (Cd) didapatkan nilai W_L dan P_{heff} dapat dicari sebagai berikut.

$$W_L = 100\% - C\% = 100\% - 80\% = 20\%$$

$$P_{heff} = 14/24 \times 204/365 \times 0.20 \times 100 = 0.58 \times 0.55 \times 0.20 \times 100 = 6.38\%$$

$$T_{jam} = 14 \text{ Jam per hari}$$

$$T_{hari} = 204 \text{ hari hujan dalam setahun}$$

Berdasarkan data perhitungan curah hujan per tahun didapatkan 14 jam per hari dapat disimpulkan bahwa kualitas drainase adalah *excellent*. Berdasarkan

nilai P_{heff} sebesar 6.38% dan kualitas drainase *excellent* yang dimana air mengalir dengan sangat baik maka didapatkan nilai koefisien drainase berdasarkan Tabel 7.

Tabel 7. Nilai koefisien drainase

Quality of Drainage	Percent of time pavement structure is exposed to moisture levels approaching saturation			
	< 1%	1-5%	5-25%	> 25%
Excellent	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Good	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Fair	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Poor	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Very Poor	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Sumber: AASHTO, 1993

Dari Tabel 7 di atas dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien drainase diantara 1.15-1.10. Dari hasil perhitungan menggunakan Interpolasi didapatkan bahwa nilai koefisien drainase sebesar 1.125.

3.1.12 Nilai CESAL rencana

Berdasarkan rumus dari Persamaan 2 maka nilai CESAL rencana menurut masing-masing *variable* dapat dilihat seperti Tabel 8.

Tabel 2. Hubungan reliabilitas dan standar normal deviasi

No	Parameter	AASHTO 1993	Desain
1	Reliabilitas (R)	55%-99.9%	0.9
2	Standar Deviasi Keseluruhan (So)	0.30-0.40	0.35
3	Standar Deviasi Normal (Zr)	0.9	-1.282
4	Tingkat Pelayanan Awal (Po)	4.5	4.5
5	Tingkat Pelayanan Akhir (Pt)	2.5 atau 3.0	3
6	ΔPSI	P0-Pt	2
7	Modulus Reaksi Tanah Dasar (k)	Berdasar CBR = 6%	30 pci
8	Modulus Elastisitas Beton (Ec)	Berdasar $F_c' = 320 \text{ kg/cm}^2$	3,844,944.707 psi
9	Modulus Keruntuhan Beton (Sc')	Berdasar $S_c' = 45 \text{ kg/cm}^2$	640
10	Koefisien Beban Transfer Beban (J)	2.5-3.1	2.5
11	Tebal Pelat Beton (D)	-	29 cm = 11.42 inc
12	Koefisien Drainase (Cd)	0.80-0.70	1.125
13	Umur Rencana	20 Tahun	-
14	Lalu Lintas, ESAL	-	22,913,047.83

3.2 Analisis Nilai CESAL Aktual

Setelah mencari nilai CESAL rencana yang nantinya digunakan sebagai perbandingan dalam menghitung umur sisa perkerasan kaku pada ruas jalan tol Solo-Ngawi, langkah selanjutnya yaitu menghitung nilai CESAL aktual dimana parameter-parameter untuk mencarinya adalah sebagai berikut:

3.2.1 Nilai volume lalu lintas harian

Volume lalu lintas adalah banyaknya kendaraan yang melintas atau melewati suatu titik dibagian jalan pada jarak waktu tertentu. Volume lalu lintas biasanya dinyatakan dalam satuan kendaraan atau satuan mobil penumpang (SMP). Volume lalu lintas aktual (LHR) adalah volume lalu lintas harian aktual yang melintas pada ruas jalan tertentu. LHRT adalah lalu lintas harian rata-rata tahunan pada akhir tahun lalu lintas. Untuk LHRT pada ruas jalan tol Solo-Ngawi dari tahun 2019 hingga 2022 dapat dilihat pada Tabel 9.

3.2.2 Faktor distribusi lajur dan faktor distribusi arah

Kondisi konfigurasi aktual jalan tol Solo-Ngawi seperti yang telah dijelaskan dengan nilai faktor distribusi lajur (DL) adalah 0.8. Untuk

memperhitungkan faktor distribusi arah (DD) nilainya adalah antara 0.3-0.7 akan tetapi pada umumnya berdasarkan buku Manual Desain Perkerasan Bina Marga 2017 untuk jalan dua arah, faktor distribusi arahnya sebesar 0.5.

3.2.3 Nilai beban sumbu kendaraan

Data beban kendaraan aktual nantinya digunakan untuk menentukan nilai daya rusak kendaraan (*vehicle damage factor/VDF*). VDF adalah data beban kendaraan yang diperoleh dari survei WIM (*Weigh in Motion*) yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (Pusjatan) pada tahun 2019. Data beban kendaraan ini merupakan data beban aktual pada jalan tol Solo-Ngawi yang ditunjukkan pada Tabel 10.

Dari beberapa parameter seperti nilai LHRT, nilai faktor distribusi lajur, faktor distribusi arah serta nilai VDF maka selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung ekuivalensi beban sumbu lalu lintas (ESAL) aktual menggunakan Persamaan 1. Berdasarkan persamaan 1. Nilai CESAL Aktual selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 9. LHRT pada ruas jalan tol Solo-Ngawi

Tahun	Solo-Ngawi					Ngawi-Solo				
	Golongan Kendaraan									
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
2019	6,933	684	247	50	35	6,980	411	135	35	22
2020	5,439	725	254	47	44	5,407	493	154	33	26
2021	6,692	908	317	64	54	6,495	672	198	45	38
2022	8,663	958	359	77	64	8,524	776	254	60	43

Tabel 10. Data *weigh in motion* ruas jalan tol Solo-Ngawi

No	Klasifikasi Kendaraan	Konfigurasi Sumbu	Solo-Ngawi	Ngawi-Solo	Gol.
1	Kendaraan Ringan	1.1	4,470	3,430	I
2	Truck 2 Sumbu	1.2	4,910	3,820	II
3	Truck 3 Sumbu	1.1.2	17,170	26,080	III
4	Truck 3 Sumbu	1.2.2	27,530	29,730	
5	Truck Gandeng 4 Sumbu	1.2+2.2	31,800	29,730	IV
6	Truck Gandeng 5 Sumbu	1.1.2+2.2	40,440	38,940	
7	Trailer 4 Sumbu	1.2.2.2	33,890	32,765	
8	Trailer 5 Sumbu	1.2.2.2.2	40,430	38,280	V
9	Trailer 5 Sumbu	1.2.2.2.2	39,360	38,125	
10	Trailer 6 Sumbu	1.2.2.2.2.2	49,110	48,050	

Tabel 11. Perhitungan ESAL

Tahun	Solo-Ngawi					Ngawi-Solo					Arah Solo	Arah Ngawi
	Golongan Kendaraan											
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V		
2019	11,394	2,658	1,498,189	78,989	120.550	3,977	585	656,900	47,495	69,139	1,711,780	778,097
2020	8,938	2,817	1,539,056	74,483	149.443	3,081	703	752,976	44,884	80,745	1,774,637	882,388
2021	10,998	3,528	1,918,787	100,867	185.475	3,700	957	966,521	61,095	118,117	2,219,654	1,150,330
2022	14,237	3,726	2,176,319	120,538	218.797	4,856	1.105	1,237,617	80,670	134,899	2,533,617	1,459,148

Dari hasil Analisa nilai ESAL aktual masing-masing lajur, selanjutnya kumulatifkan hasil tersebut dari tahun 2019-2022 sehingga didapatkan nilai kumulatif ESAL aktual hingga tahun 2022 yang dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Kumulatif ESAL

Tahun	Arah Solo	Arah Ngawi
2019	1,711,780	778,097
2020	3,486,417	1,660,485
2021	5,706,071	2,810,875
2022	8,239,688	4,270,023

Dari hasil kumulatif di atas dapat disimpulkan bahwa untuk arah Solo hingga tahun 2022 telah tercapai sebanyak 8,239,688 ESAL, sedangkan untuk arah Ngawi hingga tahun 2022 telah tercapai 4,270,023 ESAL. Dapat disimpulkan juga bahwa pergerakan ESAL dari arah Solo lebih besar daripada yang ke arah Ngawi.

3.3 Umur Sisa Perkerasan Kaku Ruas Jalan Tol Solo-Ngawi

Setelah nilai CESAL aktual dan CESAL rencana didapatkan untuk menghitung nilai umur sisa perkerasan dapat dihitung menggunakan persamaan dari AASHTO 1993

Untuk menghitung umur sisa perkerasan jalan tol Solo-Ngawi dapat dihitung per arah karena total nilai ESAL untuk masing-masing arah berbeda. Perhitungan umur sisa berdasarkan Persamaan 3 untuk kedua arah dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Remaining life

Variabel	Solo-Ngawi	Ngawi-Solo
N_p (Nilai ESAL pada tahun n)	8,239,688 ESAL	4,270,023 ESAL
$N_{1.5}$ (Nilai ESAL rencana)	22,913,047 ESAL	22,913,047 ESAL
Remaining life	64.04 %	81.37 %

Jalan tol Solo-Ngawi memulai pembangunan pada tahun 2015 dengan rencana masa konsensi selama 50 tahun. Tol Solo-Ngawi sendiri mulai beroperasi secara keseluruhan pada tahun 2019, namun berdasarkan data *traffic* aktual terjadi peningkatan dari pertumbuhan lalu lintas rencana maka mengitung umur sisa perkerasan ini sangat diperlukan.

Berdasarkan hitungan umur sisa pada masing-masing lajur pada Tabel 13 maka didapatkan nilai pada arah Solo-Ngawi masih tersisa kekuatannya sebesar 64.04 % dan masa layan perkerasan yang sudah digunakan sebesar 35.96 %, sedangkan untuk arah Ngawi-Solo masih tersisa kekuatannya sebesar 81.37 % dan masa layan perkerasan yang sudah digunakan sebesar 18.63 %.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis evaluasi umur sisa perkerasan kaku pada ruas jalan tol Solo-Ngawi yang telah dibahas dapat diambil kesimpulan bahwa nilai CESAL rencana berdasarkan parameter perkerasan yang ada didapatkan nilai sebesar 22,913,047 ESAL, sedangkan berdasarkan parameter lalu lintas dalam menghitung nilai CESAL aktual didapatkan nilai untuk masing lajur sebesar 8,239,688 ESAL untuk arah Solo-Ngawi dan 4,270,023 ESAL untuk arah Ngawi-Solo. Setelah didapatkan nilai CESAL rencana dan CESAL aktual maka nilai *remaining life* untuk masing-masing lajur didapatkan nilai 64.04% untuk arah Solo dan 81.37% untuk arah Ngawi. Dari nilai *remaining life* dapat diambil simpulan bahwa pada ruas Solo-Ngawi terjadi penurunan kapasitas jalan walaupun belum habis masa layannya.

Kelemahan untuk penelitian ini belum didetailkan mengenai proyeksi dimana sekiranya tahun habis masa layan jalan berdasarkan pertumbuhan lalu lintas serta tidak di evaluasi program pemeliharaan yang sekiranya pantas untuk meningkatkan masa layan jalan. Saran untuk penelitian berikutnya dapat didetailkan mengenai proyeksi tahun jalan mencapai nilai maksimal masa layan tersebut, serta diberikan evaluasi program pemeliharaan untuk meningkatkan masa layan jalan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A. N. (2022). Analisis Kondisi Fungsional Ruas Jalan Jeni-Merakurak Dengan Menggunakan Metode PSI dan RCI Serta Prediksi Sisa Umur Perkerasan Jalan (Remaining life). *Paduraksa*, 11(2019), 127–139. <https://doi.org/10.22225/pd.11.1.4834.127-139>
- Ahmed, F., Thompson, J., Kim, D., Huynh, N., & Carroll, E. (2021). Evaluation of pavement service life using AASHTO 1972 and mechanistic-empirical pavement design guides. *International Journal of Transportation Science and Technology*, xxx, 0–2. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2021.11.004>
- Aji, Z. A., & Susilo, B. H. (2023). Evaluasi Tebal Perkerasan Jalan Menggunakan Program Software Kenpave. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, 01(01), 96–105. <https://doi.org/10.25105/jrltb.v1i1.15921>
- Apriyatno, T. (2015). Uji Komparasi Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur dan Kaku Metode AASHTO 1993 (Studi Kasus Proyek KBK Peningkatan Jalan Nasional Banyumanik – Bawen). *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*, 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.15294/jtsp.v17i1.6895>
- Bagaskara, R., Riani, D., & Murniati. (2021). Kinerja Sisa Umur Rencana Jalan Berdasarkan Pertumbuhan Lalu Lintas di Kota Palangka Raya. *Jurnal Kacapuri*, 4(2), 194–201. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.31602/jk.v4i2.6426>
- Dwiputra, A. Y., Utomo, S. H. T., & Mulyono, A. T. (2021). Prediksi Sisa Umur Perkerasan Lentur Dengan Metode Mekanistik-Empirik Ruas Jalan Prof. Dr. Wirjono Prodjodikoro, Yogyakarta. *Jurnal Transportasi*, 21(3), 173–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.26593/jtrans.v21i3.5447>
- Fahrurrozi, Wibisono, G., & Muhammad Yusa. (2020). Evaluasi Struktur Perkerasan Lentur Dengan Metode Empiris dan Mekanistik-Empiris. *Jurnal APTEK*, 12(2), 102–107. <https://doi.org/https://doi.org/10.30606/aptek.v12i2.351>
- Hamdi, B., Putra, R., Alwinda, Y., & Aka, M. R. (2022). Penanganan Jalan Berdasarkan Umur Sisa Perkerasan dan Internatioanl Roughness Index (IRI) pada Ruas Jalan Nasional Simpang Kayu Ara - Batas Kabupaten Pelalawan Provinsi Riau. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 9(2), 61–67. <https://doi.org/10.21063/JTS.2022.V902.061-67>
- Hendito, H. (2021). Evaluasi Kerusakan Perkerasan Lentur Ruas Tol Jakarta - Cikampek dan Alternatif Penanganannya. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 4(4), 837–844. <https://doi.org/https://doi.org/10.24912/jmts.v4i4.12640>
- Kardinata, & Darmadi. (2020). Evaluasi Tebal Perkerasan Kaku Menggunakan Metode PCA , Bina Marga 2002 , AASHTO 1993 , dan Hru. *Jurnal Teknik Sipil - Arsitektur*, 19(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.54564/jtsa.v19i2.48>
- Mubarak, M., Rulhendri, R., & Syaiful, S. (2020). Perencanaan Peningkatan Perkerasan Jalan Beton Pada Ruas Jalan Babakan Tengah Kabupaten Bogor. *ASTONJADRO: Jurnal Rekayasa Sipil*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v9i1.2694>
- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure*. Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials
- Prasetyo, E., Sumina, Prayitno, K. J., & Amhudo, R. L. (2023). Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku Pada Jalan Tol Solo - Yogyakarta - NYIA Kulon Progo Dengan Metode Bina Marga 2017. *Journal Of Civil Engineering And Infrastructure Technology*, 2(1). <https://doi.org/10.36728/jceit.v2i1.2664>
- PT. Jasamarga Solo Ngawi. (2020). Company profile. In *PT. Jasamarga Solo Ngawi*.
- Putra, N. M., Silitonga, S. P., & Robby. (2021). Analisis Sisa Umur Rencana Jalan Berdasarkan Pertumbuhan Lalu Lintas di Kota Palangka Raya. *Jurnal Teknik*, 4(2), 155–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.52868/jt.v4i2.2729>
- Rahadian, R. (2018). *Evaluasi Kondisi Perkerasan Lentur dan Prediksi Umur Layanan Ruas Jalan Wonosari - Mulo KM 4 - 5* (Vol. 5) [Universitas Islam Indonesia]. <https://doi.org/https://doi.org/10.36761/hexagon.v4i2.32>
- Ratnasari, H., & Suparma, L. B. (2021). Prediksi Present Serviceability Index Untuk Analisis Sisa Umur Layan Perkerasan Lentur. *Jurnal HPJI*, 7(2), 153–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.26593/jhpji.v7i2.5059.1>
- Ridwan, F., & Care, A. M. (2012). Evaluasi Kondisi Struktural Perkerasan Lentur Menggunakan Metoda AASHTO 1993 Studi Kasus : Ruas Ciasem-Pamanukan (Pantura). *Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), 53–64. <https://doi.org/10.5614/jts.2012.19.1.5>
- Sugiyono. (2016). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan Kombinasi (Mixed Methods)*.
- Suryadi, A., & Susilo, B. H. (2017). Komputerisasi Penentuan Tebal Perkerasan Kaku Dengan Metode AASHTO 1993. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(65), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.28932/jts.v13i1.1425>
- Usman, R. S., Setyawan, A., & Suprpto, M. (2018). Prediction of pavement remaining service life based on repetition of load and permanent deformation Prediction of pavement remaining service life based on repetition of load and permanent deformation. *IOP Publishing*, 333. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012089>