JOURNAL FLYOVER (JFO)
Magister Teknik Sipil Program Pascasarjana UMI

Vol. 05, No. 01 Tahun 2025
E-ISSN: 2829-5684

Pengaruh Penggunaan Minyak Pelumas Bekas Terhadap Lapisan Aspal Beton dan Prediksi Sisa Umur Perkerasan Jalan Menggunakan Metode Mekanistik Empirik Program Kenpave

Khofifah Natsir [1*], Lambang Basri Said [2], Andi Alifuddin [3]

1*) Magister Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar,
khofifahnatsir3.kn@gmail.com
2) Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar
3) Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar

Abstract

Waste lubricating oil (WLO) is classified as hazardous and toxic waste (B3) that can be reused as an additive in asphalt concrete mixtures to support sustainable development. This study aims to determine the effect of adding WLO on the characteristics of asphalt concrete mixtures and to predict the remaining pavement life using the mechanistic–empirical approach with the Kenpave program. The methods used in this study include laboratory testing and numerical simulations. The asphalt concrete mixture was tested using the Marshall method, Indirect Tensile Strength (ITS), and elastic modulus analysis. Numerical simulations were conducted using the Kenpave program to model deflections and predict pavement service life based on the Asphalt Institute 1999 method. The results showed that the addition of WLO affected the mixture stability at 2% WLO by 1024 kg. However, increasing the WLO percentage led to a decrease in stability, although the mixture still met the specified requirements for pavement layers. The highest elastic modulus value was obtained in the 2% WLO mixture, reaching 1317300.01 kPa, with horizontal strain of 310.96 microstrain and vertical strain of 441.10 microstrain. Based on the Kenpave simulation results, the remaining pavement life was predicted to reach 17 years for the 2% WLO mixture. In conclusion, although WLO is classified as waste, its use as an additive in asphalt concrete mixtures can improve structural performance and extend pavement service life.

Keywords: Asphalt Concrete, Kenpave, Mechanistic–Empirical Method, Pavement Life, Waste Lubricating Oil.

Abstrak

Minyak pelumas bekas (MPB) merupakan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan tambah dalam campuran aspal beton untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan MPB terhadap karakteristik campuran aspal beton dan memprediksi sisa umur perkerasan dengan pendekatan mekanistik-empirik menggunakan program Kenpave.Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan eksperimental laboratorium dan simulasi numerik. Campuran aspal beton diuji dengan variasi kadar MPB sebesar 0%, 2%, 4%, dan 6% terhadap berat aspal. Pengujian meliputi uji Marshall, Indirect Tensile Strength (ITS), dan analisis modulus elastitas. Hasil pengujian digunakan sebagai input dalam program Kenpave untuk memodelkan tegangan-regangan dan memprediksi umur sisa perkerasan berdasarkan metode Asphalt Institute 1999. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan MPB mempengaruhi nilai stabilitas campuran pada 2% sebesar 1.024 kg. Namun semakin bertambahnnya persentase MPB maka stabilitas mengalami penurunan namun masih memenuhi spesifikasi, modulus elastisitas , dan umur teknis perkerasan. %. Nilai modulus elastisitas tertinggi juga terdapat pada campuran 2% MPB sebesar 13137000.01 KPa. nilai ini dapat mempengaruhi pada Program Kenpave Menghasilkan nilai regangan horizontal sebesar 310.90 microstain dan regangan vertical sebesar 441.10 microstain. Dengan prediksi umur perkerasan jalan dari 5 tahun sampai 7.5 tahun. Kesimpulannya, meskipun MPB dapat dimanfaatkan

sebagai bahan tambah dalam campuran aspal beton, penggunaannya perlu dibatasi pada kadar tertentu untuk menjaga performa struktural dan memperpanjang umur layanan perkerasan jalan.

Kata kunci: Aspal Beton, Kenpave, Metode Mekanistik-Empirik, Minyak Pelumas Bekas, Umur Perkerasan.

1. PENDAHULUAN

Transportasi saat ini menjadi kebutuhan yang sangat tidak dapat dipisahkan dari Masyarakat. Seluruh Masyarakat sering dengan berkembangnya jaman dituntut untuk menggunakan sarana trransportasi yang cepat dan efisien. Jalan merupakan prasarana transportasi yang sangat penting dan tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia. Jalan sangat dibutuhkan untuk memperlancar kehidupan manusia sehari – hari. Selain itu jalan memegang peranan penting dalam segala sektor, baik sektor ekonomi, social, budaya, politik, industry, pertahanan dan keamanan.

Dalam dunia transportasi tentu ada berbagai macam permasalahan dan yang paling utama adalah Permasalahan kerusakaan jalan khususnya perkerasan lentur di Indonesia berdasarkan hasil kajian Direktorat Jendral Bina marga (Ditjen Bina marga, 2011) bekerja sama dengan Indonesia Infrastruktur Initiatie (IndII, 2011) adalah muatan berlebih sebesar 47 %, kualitis pemeliharaan sebesar 20%, faktor desain sebesar 18%, serta kualitas konstruksi sebesar 15%. Perkerasan jalan mempunyai umur rencana tertentu sesuai dengan umur desain yang telah ditetapkan. Umur rencana yang digunakan dalam desain Indonesia adalah 10 tahun untuk perkerasan lentur. Selama masa layanan, pekerasan akan mengalami pembebanan berulang. Ruas jalan dengan arus lalu lintas tinggi tercermin Lalulintas Harian Rata-rata Tahunan (LHRT) yang besar, artinya repetisi beban yang terjadi akan semakin banyak. Kondisi ini perlu diantisipasi dengan langkah-langkah pencegahan, utamanya dengan pemeliharaan jalan.

Saat ini Pembangunan jalan diperhadapkan pada penyempurnaan kualitas dan penghematan biaya Pembangunan. Perkembangan penelitian tentang bahan konstruksi perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur (Flexible Pavement) diarahkan pada usaha pemanfaatan material setempat dan disesuaikan dengan kondisi daerah Dimana konstruksi perkerasan akan dilaksanakan. Berbagai usaha dalam Upaya meningkatkan kualitas perkerasan aspal dengan menggunakan bahan tambah seperti modified campuran dengan penggunaan bahan daur ulang(Lagaligo et al., 2022).

Salah satu bahan alternatif yang coba diteliti ialah Penggunaan Minyak Pelumas Bekas (MPB) yang merupakan limbah yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia seperti industry, pertambangan dan usaha bengkel kendaraan bermotor. MPB termasuk dalam limbah B3 (Bahan Berbahaya Beracun yang mudah terbakar yang apabila pembuangannya tidak diperhatikan(Djakfar et al., 2015). Namun kehadiran Minyak Pelumas Bekas dapat mengisi ruang – ruang antar agregat serta lebih ekonomis dan ramah lingkungan dikarenakan sifatnya yang berasal dari limbah.

Oleh karena itu, struktur perkerasan jalan, harus dilakukan evaluasi untuk mengetahui dan memastikan apakah struktur perkerasan tersebut dapat menerima beban lalu-lintas rencana selama umur rencana atau tidak. Untuk mengevaluasi struktur perkerasan jalan dapat menggunakan pendekatan mekanistik-empirik yaitu dengan bantuan aplikasi Kenpave. Aplikasi Kenpave merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh dr. Yang H. Huang P.E. Aplikasi Kenpave diciptakan untuk menganalisis regangan tarik dan regangan tekan yang terjadi pada struktur perkerasan jalan(Lia & Purwo, 2017).

Tujuan penelitian ini adalah untuk (1) menganalisis Respon tegangan-regangan yang terjadi akibat Penambahan Minyak Pelumas Bekas (MPB) pada Lapisan Aspal Beton mengunakan metode mekanistik - empirik program KENPAVE. (2) untuk menganalisis Prediksi Umur perkerasan menggunakan metode Asphalt Institute 1999 jika diberikan

pengaruh Minyak Pelumas Bekas Pada Lapis AC-WC dan (3) untuk menganalisis efektivitas Performa Penambahan Minyak Pelumas Bekas pada Lapis AC-WC

2. METODE

A. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, dengan dukungan data lapangan yang diambil dari ruas Jalan Yogyakarta–Magelang, seperti data Lalu Lintas Harian Rata-Rata (LHRT) dan koordinat kedalaman struktur perkerasan. Kegiatan penelitian di laboratorium meliputi tahapan pemeriksaan bahan, penentuan komposisi, pembuatan sampel, hingga pengujian.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi aspal minyak penetrasi 60/70 (AC 60/70) produksi Pertamina, agregat kasar dan abu batu yang berasal dari proses pemecahan batu alam di daerah Bili-Bili, Kabupaten Gowa, serta bahan tambah berupa minyak pelumas bekas (MPB) yang diperoleh dari bengkel di Kota Makassar. Proses pengujian dilakukan menggunakan peralatan Indirect Tensile Strength (ITS) dan Marshall Test yang tersedia di Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan, guna memastikan kualitas dan kinerja campuran yang diteliti.

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan persiapan bahan, yaitu pengumpulan seluruh material yang dibutuhkan untuk pembuatan campuran beton aspal dan pemeriksaannya di Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia. Setelah itu dilakukan pemeriksaan karakteristik bahan untuk memastikan kesesuaian dengan standar pekerjaan jalan. Pengujian aspal meliputi uji penetrasi (SNI 08-2456:2011), titik lembek (SNI 08-2434:2011), viskositas (SNI 06-8138:2015), titik nyala dan titik bakar (SNI 06-2456:2011), daktilitas (SNI 06-2432:2011), serta berat jenis (SNI 06-2441:2011). Sementara itu, pengujian agregat mencakup analisis saringan (Spesifikasi Bina Marga 2010), berat isi (AASHTO T-19-71; ASTM C 27-71), berat jenis dan penyerapan (AASHTO T-85-74; ASTM G.127-68), soundness test (ASTM C.88-60), serta uji kelekatan agregat terhadap aspal (AASHTO–182).

Perencanaan campuran dalam penelitian ini dilakukan dengan metode trial and error untuk menentukan proporsi agregat yang menghasilkan gradasi gabungan sesuai spesifikasi yang disyaratkan. Proses ini diawali dengan menentukan gradasi setiap fraksi agregat berdasarkan persentase berat lolos saringan, kemudian menggabungkan fraksi-fraksi tersebut hingga mendekati spesifikasi ideal. Langkah-langkahnya mencakup pemahaman batasan gradasi, memasukkan data spesifikasi ke dalam tabel perencanaan, menghitung persentase lolos saringan untuk masing-masing jenis agregat, dan mengkombinasikan agregat kasar, halus, serta filler dengan jumlah total 100%. Proses ini diulang hingga komposisi campuran mendekati nilai spesifikasi ideal yang telah ditentukan.

Penentuan kadar aspal rencana dilakukan setelah proporsi agregat campuran diperoleh dari tahap sebelumnya. Kadar aspal rencana dihitung menggunakan persamaan tertentu yang mempertimbangkan persentase agregat pada saringan No. 8 dan No. 200, persentase lolos saringan, serta faktor koreksi yang menyesuaikan kadar aspal dengan sifat agregat. Perhitungan ini memberikan nilai perkiraan awal kadar aspal yang kemudian akan diuji lebih lanjut untuk mendapatkan kadar aspal optimum.

Penentuan berat agregat dan berat aspal dilakukan setelah komposisi campuran agregat dan kadar aspal rencana diketahui. Agregat yang digunakan dikeringkan hingga berat konstan untuk memastikan permukaan bebas dari kelembaban, kemudian dicampur dengan aspal

pada suhu pencampuran yang sesuai dengan viskositas 170 ± 20 cSt dan suhu pemadatan 100–120 cSt. Campuran tersebut dimasukkan ke dalam mould dan dipadatkan sebanyak 75 tumbukan pada tiap sisi untuk menghasilkan benda uji Marshall yang memenuhi standar kepadatan dan kekuatan.

Rencana pembuatan uji mencakup pembuatan benda uji setelah semua bahan dinyatakan memenuhi spesifikasi. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah lima tingkatan untuk penentuan kadar aspal optimum (KAO) dengan total 15 sampel. Selain itu, dibuat benda uji untuk pengujian penambahan minyak pelumas bekas (MPB) pada kadar 0%, 2%, 4%, dan 6%, masing-masing untuk pengujian Marshall dan ITS, sehingga total seluruh benda uji yang dibuat dalam penelitian ini berjumlah 39.

Rencana pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) bertujuan untuk menentukan sifat mekanis campuran aspal, seperti tegangan, regangan, modulus elastisitas, dan angka Poisson pada variasi campuran dengan penambahan MPB. Pengujian ini dilakukan sesuai persamaan standar yang digunakan dalam metode ITS untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap gaya tarik tidak langsung.

Metode analisis data pengujian kadar aspal rencana mencapai nilai KAO dilakukan dengan mengolah hasil uji Marshall melalui analisis regresi dan korelasi. Analisis ini bertujuan untuk memodelkan hubungan antara kadar aspal dengan parameter Marshall, memilih bentuk persamaan polynomial berderajat dua yang memberikan penyimpangan kuadrat terkecil, dan menentukan kadar aspal optimum secara matematis dengan menurunkan persamaan regresi tersebut. Nilai KAO diperoleh pada titik di mana parameter Marshall mencapai hasil terbaik sesuai kriteria spesifikasi teknis.

C. Tahapan Metode Mekanistik Empirik Kenpave

Hasil pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) di laboratorium menjadi dasar untuk proses analisis lanjutan menggunakan aplikasi Kenpave, yang kemudian dipadukan dengan sejumlah data sekunder guna memperkuat hasil penelitian. Dalam metode mekanistik, keunggulannya terletak pada peningkatan reliabilitas desain, kemampuan memprediksi jenis kerusakan, dan peluang memperkirakan kinerja perkerasan meskipun data lapangan atau laboratorium terbatas. Namun, kelemahannya adalah kebutuhan akan peralatan uji yang relatif mahal untuk menentukan karakteristik struktural material perkerasan lentur. Oleh karena itu, penelitian ini memanfaatkan data sekunder seperti Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) dari studi terdahulu pada ruas jalan yang relevan, tebal tiap lapis perkerasan, dan data dari Manual Desain Perkerasan 2024. Aplikasi Kenpave, khususnya modul KENLAYER, digunakan karena mampu menganalisis perilaku perkerasan lentur tanpa sambungan dan berdasarkan teori sistem lapis banyak. Program ini memungkinkan analisis berbagai jenis perilaku lapisan (linier, nonlinier, viskoelastis) serta berbagai konfigurasi sumbu roda, dengan input data meliputi parameter material, geometri lapisan, kondisi ikatan antarlapisan, modulus elastisitas, dan beban lalu lintas.

Dalam penggunaannya, KENLAYER memiliki beberapa menu utama seperti General, Zcoord, Layer, Interface, Moduli, dan Load. Menu General berfungsi mengatur informasi dasar seperti jenis material, jumlah lapisan, koordinat analisis, dan satuan yang digunakan. Menu Zcoord mengatur titik kedalaman yang akan dianalisis, sedangkan Layer memuat data tebal lapisan dan nilai Poisson’s ratio. Menu Interface hanya aktif jika antar lapisan tidak terikat sempurna, sedangkan Moduli berisi data modulus elastisitas tiap lapisan. Menu Load menentukan jenis sumbu roda, radius kontak, besaran beban, serta jarak antar roda yang menjadi variabel pembebanan. Seluruh parameter ini dimasukkan berdasarkan hasil pengujian laboratorium, terutama modulus elastisitas dan Poisson’s ratio campuran aspal dengan bahan tambah minyak pelumas bekas (MPB).

Selanjutnya, data empiris hasil pengujian laboratorium tersebut diintegrasikan ke dalam Kenpave untuk menghasilkan nilai tegangan dan regangan pada berbagai kondisi pembebanan. Nilai-nilai ini digunakan untuk memodelkan umur rencana perkerasan menggunakan metode Asphalt Institute (1999). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kinerja perkerasan secara lebih realistis, karena menggabungkan data mekanistik dari model komputasi dengan data empiris dari laboratorium. Hasil analisis ini diharapkan mampu memberikan prediksi umur perkerasan yang lebih akurat sekaligus mengidentifikasi potensi titik lemah yang memerlukan perhatian dalam desain atau pemeliharaan jalan.

D. Metode Analisis Data

Metode analisis data dalam penelitian ini diawali dengan penentuan kadar aspal rencana berdasarkan hasil komposisi agregat yang telah diperoleh sebelumnya. Selanjutnya, kadar aspal optimum ditentukan melalui pendekatan persamaan polynomial tingkat dua dan metode diferensial untuk mendapatkan nilai yang memberikan kinerja terbaik pada campuran. Setelah kadar aspal optimum diketahui, dilakukan pengujian Marshall untuk menganalisis karakteristik campuran, meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient, rongga terisi aspal (VFA), rongga terisi agregat (VMA), rongga udara (VIM), serta nilai density campuran.

Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) dilakukan untuk memperoleh parameter regangan, tegangan, kuat tarik, modulus elastisitas, dan angka Poisson. Hasil dari pengujian ini kemudian diintegrasikan ke dalam analisis menggunakan aplikasi Kenpave untuk menghitung regangan horizontal dan vertikal pada struktur perkerasan. Tahap akhir adalah perhitungan sisa umur perkerasan melalui evaluasi potensi fatigue cracking dan rutting, sehingga dapat diperkirakan ketahanan struktur terhadap beban lalu lintas selama umur rencananya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemeriksaan Karakteristik Agregat

Agregat kasar dan abu batu yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Bili-Bili, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, dan telah disiapkan sesuai fraksi yang dipersyaratkan dalam gradasi campuran. Seluruh material diuji di Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia untuk memastikan kesesuaian dengan Spesifikasi Umum Perkerasan Aspal – Divisi 6 Tahun 2018. Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah ukuran 0,5–1 cm dan 1–2 cm, sedangkan agregat halus berupa abu batu. Pengujian gradasi agregat kasar dilakukan dengan metode analisa saringan sesuai standar AASHTO T-27-74 dan ASTM C 136-46, menghasilkan distribusi partikel yang sesuai dengan batas spesifikasi. Sementara itu, pengujian agregat halus juga menunjukkan bahwa seluruh parameter seperti berat jenis, penyerapan air, sand equivalent, berat isi, dan soundness test berada dalam batasan standar, menandakan kualitas material yang baik untuk digunakan pada campuran beton aspal.

Hasil pengujian gradasi kedua jenis agregat ini kemudian digunakan untuk menyusun gradasi campuran yang sesuai dengan spesifikasi AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course). Proses penggabungan dilakukan dengan metode trial and error, di mana komposisi akhir ditetapkan sebesar 52% abu batu, 17% batu pecah 1–2 cm, dan 31% batu pecah 0,5–1 cm. Nilai persentase lolos saringan masing-masing fraksi dikalikan dengan proporsi tersebut, lalu dijumlahkan untuk mendapatkan distribusi gabungan. Hasil akhir menunjukkan bahwa gradasi campuran yang diperoleh masuk dalam rentang spesifikasi

dan mendekati gradasi ideal, sehingga layak digunakan dalam tahap selanjutnya untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) melalui pengujian Marshall.

B. Hasil Pemeriksaan Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal keras penetrasi 60/70 produksi Pertamina, yang berdasarkan hasil pengujian karakteristik memenuhi seluruh persyaratan dalam spesifikasi sehingga layak digunakan untuk pembuatan campuran beton aspal jenis Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). Selain itu, penelitian ini juga menggunakan variasi bahan tambah berupa minyak pelumas bekas (MPB) dengan kadar 0%, 2%, 4%, dan 6% dari berat total aspal. Penambahan MPB dilakukan sesuai perhitungan berat total aspal dikalikan persentase bahan tambah yang diinginkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan MPB memengaruhi beberapa sifat aspal, seperti nilai penetrasi yang cenderung menurun, titik lembek yang meningkat, serta sedikit perubahan pada berat jenis, sementara daktilitas dan titik nyala/bakar tetap berada dalam batas yang aman dan memenuhi standar.

C. Penentuan Kebutuhan Kadar Aspal Rencana

Berdasarkan hasil penentuan fraksi campuran, kadar aspal rencana dihitung menggunakan persamaan pendekatan yang mempertimbangkan persentase agregat tertahan dan lolos pada saringan tertentu, serta faktor koreksi berdasarkan kadar lolos saringan No. 200 dan nilai absorbsi agregat. Dari perhitungan diperoleh kadar aspal rencana sebesar 5,7%, yang kemudian dibulatkan menjadi 5,5% sebagai acuan. Selanjutnya dilakukan pengujian Marshall pada lima variasi kadar aspal, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar aspal 5,5% memberikan keseimbangan terbaik antara density, kadar rongga udara (VIM), rongga terisi aspal (VFA), dan stabilitas, dengan seluruh parameter memenuhi atau melampaui batas spesifikasi untuk campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) penetrasi 60/70.

D. Hasil dan Analisis Pengujian Marshall Test

Penentuan kadar terbaik penggunaan minyak pelumas bekas (MPB) pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dilakukan dengan menganalisis grafik karakteristik Marshall yang telah dibuat sebelumnya, dan diperoleh kadar optimum sebesar 2% terhadap berat kering agregat. Hasil pengujian pada kadar tersebut menunjukkan bahwa seluruh parameter memenuhi spesifikasi, dengan stabilitas 1033 kg, flow 3,63 mm, VIM 4,40%, VMA 16,074%, VFA 72,63%, Marshall Quotient 392,89 kg/mm, dan density 2,271 kg/mm³. Penambahan MPB pada campuran memengaruhi sifat-sifat campuran aspal, di mana VIM cenderung menurun seiring bertambahnya kadar aspal, sementara VFA meningkat secara konsisten. Nilai stabilitas akan naik hingga mencapai batas optimum sebelum akhirnya menurun, sedangkan flow menunjukkan tren kenaikan seiring pertambahan kadar aspal. Adapun Marshall Quotient meningkat hingga titik tertentu, lalu mengalami penurunan setelah melewati kadar optimum.

Tabel 1 Rekapitulasi Marshall untuk Kadar Variasi Terbaik Penggunaan Minyak Pelumas Bekas

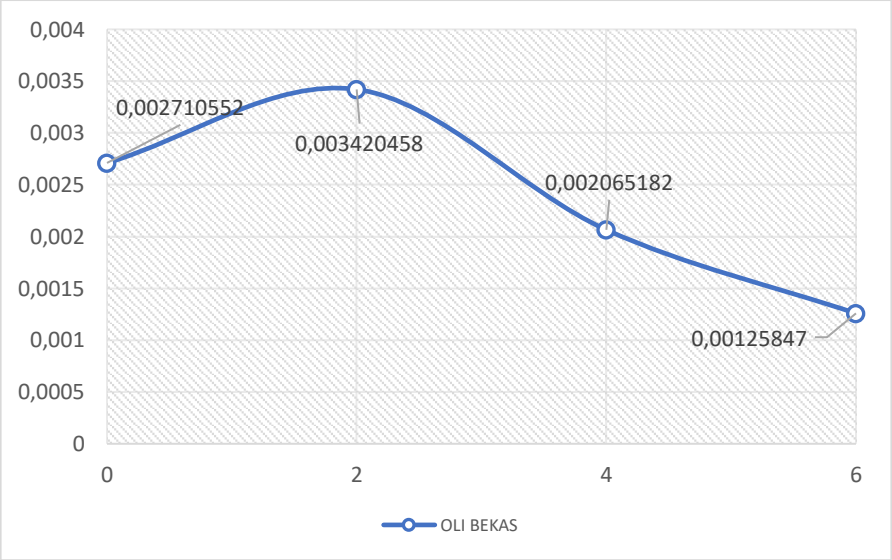
Karakteristik	2%	Spesifikasi
Stabilitas;kg	1033	800-1800 kg
Flow; mm	3.63	2-4 mm
VIM; %	4.400	3-5%
VMA; %	16.074	≥ 15%

Karakteristik	2%	Spesifikasi
VFA; %	72.63	≥ 65%
MQ; kg/mm	392,89	Min 250 kg/mm
Density	2.271	≥2.2 kg/mm^3

E. Hasil dan Analisis Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) terhadap Penggunaan Bahan Tambah Minyak Pelumas Bekas (MPB)

Pengujian kuat tarik tidak langsung (Indirect Tensile Strength/ITS) pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dengan penambahan variasi kadar Minyak Pelumas Bekas (MPB) menunjukkan bahwa penambahan aditif ini berpengaruh terhadap karakteristik mekanis campuran. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa kadar MPB sebesar 2% menghasilkan nilai ITS tertinggi, yaitu 44.934,56 KPa, sedikit lebih tinggi dibandingkan campuran normal tanpa MPB (44.558,01 KPa). Hal ini mengindikasikan bahwa pada kadar rendah, MPB dapat meningkatkan kekuatan tarik campuran karena kemampuannya menurunkan viskositas aspal dan memperbaiki kelenturan. Namun, penambahan MPB di atas 2% (yakni 4% dan 6%) justru menurunkan nilai ITS secara signifikan, yang disebabkan oleh berkurangnya kekuatan ikatan antar partikel agregat akibat pelunakan berlebihan pada aspal, sehingga benda uji lebih mudah mengalami retak.

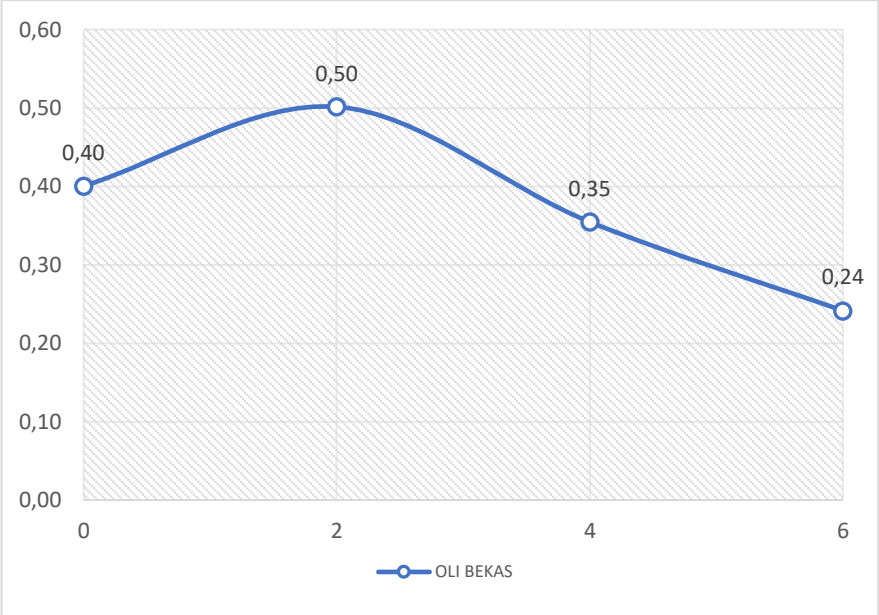
Hasil analisis regangan (ε) menunjukkan tren yang sejalan. Regangan vertikal dan horizontal meningkat pada kadar MPB 2%—dengan rata-rata regangan vertikal 0,068 dan horizontal 0,034—menunjukkan fleksibilitas yang lebih baik dibanding campuran normal. Namun, kadar 4% dan 6% menyebabkan penurunan regangan hingga masing-masing 0,058 dan 0,052 untuk regangan vertikal, menandakan campuran menjadi lebih kaku dan rentan terhadap retak akibat pengurangan kadar aspal efektif. Pada pengujian modulus elastis, nilai tertinggi justru terjadi pada kadar MPB 6% (32.663.726,93 KPa), yang menunjukkan kekakuan tinggi tetapi diiringi penurunan fleksibilitas. Hal ini mengindikasikan bahwa walaupun modulus elastis tinggi dapat menahan deformasi, terlalu tinggi kekakuan dapat mengurangi kemampuan campuran beradaptasi terhadap beban dinamis lalu lintas.



Gambar 1 Hubungan Regangan dengan kadar Minyak Pelumas Bekas (MPB)

Pengamatan terhadap angka Poisson menunjukkan bahwa kadar MPB 2% menghasilkan nilai tertinggi (0,501), mencerminkan rasio regangan horizontal terhadap vertikal yang besar, sehingga campuran lebih mampu menyebarkan deformasi sebelum retak. Namun, penambahan lebih dari 2% membuat angka Poisson menurun tajam, yang berarti campuran

kehilangan kemampuan deformasi lateral yang cukup untuk menahan beban tarik. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kadar MPB optimum berada pada kisaran 2%, karena memberikan keseimbangan antara kekuatan tarik, fleksibilitas, dan kemampuan deformasi, sedangkan kadar lebih tinggi cenderung menurunkan kinerja struktural campuran AC-WC.



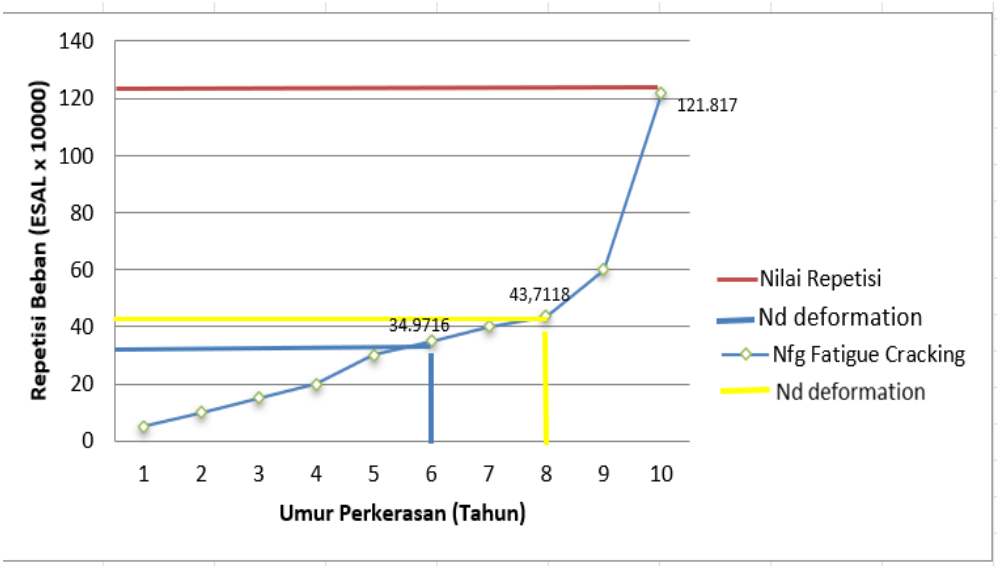
Gambar 2 Hubungan Angka Poison dengan kadar Minyak Pelumas Bekas (MPB)

F. Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur menggunakan Aplikasi KENPAVE

Setelah data input selesai dimasukkan, proses analisis pada program KENPAVE dilakukan dengan memilih menu KENLAYER untuk menjalankan simulasi dan memperoleh nilai tegangan serta regangan pada struktur perkerasan lentur. Data hasil analisis disimpan dan dapat diakses kembali melalui menu Editor, di mana file hasil perhitungan dibuka untuk melihat detail output. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai regangan horizontal di bawah lapis permukaan sebesar 310,90 microstrain untuk analisis kerusakan fatigue cracking, serta regangan vertikal di bawah pondasi bawah sebesar 441,10 microstrain untuk analisis kerusakan rutting. Perhitungan jumlah repetisi beban lalu lintas menggunakan persamaan kelelahan (Nf) dan deformasi permanen (Nd) menunjukkan bahwa rata-rata umur lelah (fatigue life) yang dihitung adalah 121.816,785 ESAL, sedangkan umur layanan akibat deformasi permanen mencapai 39.371,781 ESAL. Nilai ini menjadi acuan untuk menentukan daya tahan perkerasan terhadap beban berulang.

Analisis hubungan regangan horizontal (εht) dengan umur lelah menunjukkan bahwa semakin tinggi regangan yang diterima, umur layanan perkerasan menurun secara signifikan. Pada titik pengamatan pertama, regangan sebesar 2,35E-04 menghasilkan umur lelah sekitar 1,26 x 10^7 lintasan beban, namun saat regangan meningkat menjadi 4,26E-04, umur lelah menurun menjadi 1,22 x 10^6. Tren serupa juga terlihat pada titik kedua, di mana regangan 2,39E-04 memberi umur lelah 1,18 x 10^7, tetapi menurun menjadi 1,07 x 10^6 pada regangan 4,41E-04. Sementara itu, hubungan regangan vertikal (εvc) dengan umur layanan akibat deformasi permanen juga memperlihatkan penurunan setelah mencapai titik optimum. Nilai regangan 2,95E-04 menghasilkan umur layanan tertinggi, namun menurun drastis pada regangan lebih besar akibat ketidakmampuan modulus elastisitas campuran mengimbangi deformasi plastis yang terjadi.

Prediksi sisa umur layanan perkerasan pada Ruas Jalan Magelang–Yogyakarta menunjukkan bahwa repetisi beban aktual selama umur rencana 10 tahun mencapai 121.817 x 1000 ESAL. Kerusakan akibat deformasi permanen (rutting) diperkirakan muncul lebih awal, yaitu pada repetisi 34.976 x 1000 ESAL atau sekitar tahun ke-5, sedangkan kerusakan akibat fatigue cracking terjadi pada repetisi 43.711 x 1000 ESAL atau sekitar tahun ke-7,5. Artinya, umur efektif perkerasan berada di kisaran 5–7,5 tahun, tergantung jenis kerusakan dominan. Dengan demikian, untuk menjaga kinerja struktural jalan tetap optimal sesuai umur rencana, diperlukan strategi rehabilitasi atau pemeliharaan paling lambat sebelum tahun ke-5 apabila rutting menjadi faktor pembatas, atau sebelum tahun ke-7 apabila fatigue cracking menjadi acuan utama. Pendekatan ini akan menghindarkan terjadinya kerusakan struktural berat dan memastikan pelayanan jalan tetap memenuhi standar operasional.



Gambar 3 Grafik Repetisi Beban Rencana dan Umur Perkerasan

G. Pembahasan

Penambahan Minyak Pelumas Bekas (MPB) pada campuran aspal terbukti mempengaruhi nilai kuat tarik tidak langsung (ITS). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar MPB sebesar 2% memberikan nilai kuat tarik tertinggi, sedangkan penambahan di atas kadar tersebut justru menyebabkan penurunan kekuatan. Fenomena ini terjadi karena pada kadar optimal, MPB membantu meningkatkan fleksibilitas dan ikatan antarpartikel, sehingga campuran mampu menahan beban lalu lintas dengan baik. Sebaliknya, jika MPB berlebihan, persentase aspal efektif berkurang, campuran menjadi terlalu kaku, dan lebih rentan terhadap retak. Dengan demikian, kadar 2% dapat dianggap sebagai titik optimum penggunaan MPB untuk memperbaiki sifat mekanis campuran.

Pengaruh MPB terhadap regangan menunjukkan tren peningkatan hingga kadar 2%, di mana campuran menjadi lebih lentur dan mampu mengalami deformasi sebelum terjadi retak. Namun, penambahan lebih dari 2% menyebabkan regangan menurun akibat meningkatnya kekakuan campuran. Regangan yang optimal penting untuk mencegah kegagalan dini, karena ketika regangan melebihi kapasitas ikatan material, retak akan terbentuk dan mempercepat kerusakan. Pada kondisi optimum, penambahan MPB mampu meningkatkan regangan hingga sekitar 0,26%, yang berkontribusi pada daya tahan campuran terhadap beban berulang.

Hubungan antara MPB dan modulus elastis memperlihatkan bahwa kadar 2% menghasilkan penurunan kekakuan, sedangkan penambahan 4% hingga 6% justru meningkatkan modulus elastisitas secara signifikan. Nilai modulus yang tinggi berarti campuran semakin kaku dan mengalami deformasi yang lebih kecil ketika diberi beban, namun hal ini juga membuatnya kurang mampu menyerap energi tanpa retak. Oleh karena itu, kadar MPB yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran lebih rapuh, sedangkan kadar optimum membantu menjaga keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas.

Pengaruh MPB terhadap angka Poisson menunjukkan bahwa kadar 2% meningkatkan kemampuan campuran untuk mengalami kontraksi lateral saat menerima beban, yang menandakan peningkatan kelenturan. Peningkatan ini menguntungkan karena memungkinkan distribusi regangan yang lebih merata, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan yang memicu retak. Namun, penambahan MPB di atas 2% menyebabkan penurunan angka Poisson, yang berarti berkurangnya kelenturan dan meningkatnya risiko kerusakan struktural pada perkerasan.

Prediksi umur perkerasan menggunakan program KENPAVE menunjukkan bahwa kerusakan akibat rutting dapat muncul pada tahun ke-5, sedangkan kerusakan akibat fatigue cracking diperkirakan terjadi pada tahun ke-7,5. Total beban lalu lintas selama umur rencana 10 tahun mencapai 121.817 x 10^3 ESAL, sehingga umur teknis jalan berpotensi berakhir sebelum target umur rencana tercapai. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun MPB dapat memberikan manfaat sebagai bahan daur ulang ramah lingkungan, penggunaannya harus dikontrol agar tidak mempercepat degradasi struktural perkerasan, terutama pada ruas jalan dengan volume lalu lintas tinggi.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan Minyak Pelumas Bekas (MPB) sebesar 2% pada campuran aspal beton terbukti mampu memberikan nilai optimum terhadap sifat mekanis perkerasan, khususnya pada peningkatan fleksibilitas dan pengaturan modulus elastisitas yang berpengaruh pada respon tegangan dan regangan struktur jalan. Hasil simulasi menggunakan program Kenpave menunjukkan bahwa regangan tarik horizontal dan regangan tekan vertikal berada pada tingkat yang masih dapat diterima untuk menahan beban lalu lintas, namun prediksi umur layanan memperlihatkan bahwa kerusakan akibat deformasi permanen berpotensi muncul pada tahun ke-5 dan kerusakan akibat retak lelah pada tahun ke-7,5, sehingga umur efektif perkerasan lebih pendek dari umur rencana 10 tahun. Dengan demikian, MPB memiliki potensi sebagai bahan tambah ramah lingkungan yang dapat memanfaatkan limbah B3 untuk meningkatkan performa campuran aspal, namun penggunaannya harus dikontrol dan disesuaikan dengan desain beban lalu lintas serta kinerja struktural agar tidak mempercepat penurunan umur layanan jalan.

5. DAFTAR PUSTAKA

Afkar, Said, L. B., & H, St. M. (2021). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fungsi Transit pada Terminal Metro Makassar Berdasarkan Persepsi Pengguna. Jurnal Flyover, 1(1), 1–11. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I1.656

Alifuddin, A., Alifuddin, A., Kasim, M. R., & Maruddin, M. (2024). PERMODELAN EMPAT TAHAPAN DALAM ANALISIS DAMPAK LALU LINTAS KAMPUS UNIVERSITAS ISLAM MAKASSAR. Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan, 7(1), 1–12. https://doi.org/10.24815/jarsp.v7i1.32267

Alifuddin, A., Kasim, M. R., & Said, L. B. (2024). Perilaku Rutting dan Modulus Kekakuan dengan Penguatan Serat Ijuk pada Campuran Beton Aspal. MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL, 29(2), 223–232. https://doi.org/10.14710/MKTS.V29I2.53190

Alifuddin, A., Kasim, M. R., Gunawan, A. B., & Anies, M. K. (2023). PENDAMPINGAN PENYUSUNAN ANDALALIN CAFE DAN RESTO DI KOTA MAKASSAR. Community Development Journal : Jurnal Pengabdian Masyarakat, 4(2), 3727–3734. https://doi.org/10.31004/CDJ.V4I2.15130

Almakassari, N. D., Israil, & Amiruddin, A. K. (2023). Analisis Kinerja Lalu Lintas Akibat Operasional Rumah Potong Hewan. Jurnal Flyover, 3(2), 129–138. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I2.1674

Alwi, A., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2022). Analisis Uji Ketahanan Deformasi pada Campuran Aspal Beton dengan Bahan Tambah Anti Stripping Astive-05 terhadap Variasi Temperatur. Jurnal Flyover, 2(2), 111–122. https://doi.org/10.52103/JFO.V2I2.1348

Anies, M. K., & Kasim, M. R. (2022). Level of service pedestrian in makassar to support multimodal transportation| International Journal of Innovative Science and Research Technology. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 7(3). https://ijisrt.com/level-of-service-pedestrian-in-makassar-to-support-multimodal-transportation

Asphalt Institute. 1991. Thickness design, asphalt pavements for highways and streets, Manual Series No. 1, AI.

B, N., H, S. M., & Syarkawi, M. T. (2021). Pengaruh Tingkat Kepuasan Penumpang Terhadap Jasa Layanan Pengguna Jasa Transportasi Berbasis Aplikasi Online di Kabupaten Wajo. Jurnal Flyover, 1(2), 60–69. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I2.751

Bina Marga 1987 dan metode AASHTO 1993 menggunakan program KENPAVE (studi kasus: jalan karangmojo-semin sta 0+ …. Semesta Teknika, 20(1), 8–19.

Bulgis, B., & Alkam, R. B. (2017). Pemanfaatan Agregat Alami Dan Agregat Batu Pecah Sebagai Material Perkerasan Pada Campuran Aspal Beton. Potensi : Jurnal Sipil Politeknik, 19(1), 23–32. https://doi.org/10.35313/potensi.v19i1.530

Bulgis., Alkam, R., B., Pemanfaatan Agregat Alami Dan Agregat Batu pecah Sebagai Material Perkerasan Pada Campuran Aspal Beton. Jurnal Potensi, (2017). Vol. 19. No. 1

Departemen Pekerjaan Umum. 2010. Seksi 6.3 Spesifikasi Campuran Beraspal Panas ,Jakarta.

Departemen Pekerjaan Umum. Direktorat Jenderal Bina Marga. 1987. Metode Analisa Komponen SKBI-2.3.26.1987/SNI No:1732-1989-F.Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.

Dinata, D. I., Rahmawati, A., & Setiawan, M. D. (2017). Evaluasi Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Analisa Komponen Dari Bina Marga 1987 Dan Metode Aashto 1993 Menggunakan Program Kenpave (Studi Kasus: Jalan Karangmojo-Semin Sta 0+000 sampai Sta 4+050) . Semesta Teknika, 20(1), 8–19. http://nptel.ac.in/courses

Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga. SE Panduan Pemilihan Teknologi Pemeliharaan Preventif Perkerasan Jalan.

Djakfar, L., Bowoputro, H., Wicaksono, A., & others. (2015). Pengaruh Asbuton Terhadap Karakteristik Marshall Perkerasan Daur Ulang Dengan Peremaja Oli Bekas Dan Solar. Rekayasa Sipil, 8(2), pp-146. http://www.rekayasasipil.ub.ac.id/index.php/rs/article/view/279

Fadhlan. 2013. Evaluasi Perkerasan Tebal Perkerasan Lentur Metode Bina Marga Pt T-01-2002-B dengan Menggunakan Program KENPAVE.Universitas Sumatera Utara.

H, S. M., Basri Said, L., & Adam, M. (2021). Analisis Pengembangan Sistem Angkutan Umum di Jalur Trans Kalimantan Berdasarkan Persepsi Pengguna Terminal Batu Ampar Kota Balikpapan. Jurnal Flyover, 1(1), 50–58. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I1.661

H, St. M., Said, L. B., & Hajrah. (2021). Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kemacetan Persimpangan Jalan di Kota Makassar. Jurnal Flyover, 1(1), 41–49. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I1.660

Hamsir, R., Said, L. B., Syarkawi, M. T., & Kasim, M. R. (2024). Kajian Hambatan Samping terhadap Kinerja Ruas pada Kawasan Komersil (Studi Kasus: Jalan Boulevard Kota Makassar). Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (JUTIN), 7(4), 2252–2261. https://doi.org/10.31004/JUTIN.V7I4.34336

Hariono, I., H, S. M., & Syarkawi, M. T. (2023). Analisis Faktor yang Mempengaruhi Tingkat Kepercayaan dan Kepuasan Pengguna Transportasi Berbasis Daring Kota Makassar. Jurnal Flyover, 3(1), 36–44. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I1.1506

Haslindah, Basri Said, L., & Syafei, I. (2021). Prioritas Penanganan Ruas Jalan Nasional di Pulau Sumba dengan Metode Analytical Hierarchy Proses (AHP). Jurnal Flyover, 1(2), 17–27. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I2.747

Huang, Y.H. 2004. Pavement Analysis and Design, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

Ismail Syafar, M., Maryam, S. H., & Alifuddin, A. (2022). Analisa Kinerja Campuran Split Mastic Asphalt (SMA) dan Bahan Tambah Serat Selulosa terhadap Nilai Modulus Elastisitas dan Angka Poison dengan Variasi Suhu Pengujian. Jurnal Konstruksi: Teknik, Infrastruktur Dan Sains, 1(9), 32–42.

Jihad, A., Kadir, H., & SAR, M. (2023). Analisis Kinerja Bukaan Median U – Turn Ruas Jalan Veteran Utara. Jurnal Flyover, 3(2), 60–68. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I2.1530

Jihad, A., Kasim, M. R., B, B., & Mahendra, M. I. (2023). ANALISIS TINGKAT KERUSAKAN FLEXIBLE PAVEMENT DENGAN MENGGUNAKAN METODE SURFACE DISTRESS INDEX (SDI) DALAM PENENTUAN PENANGANAN JALAN. Jurnal Cahaya Mandalika ISSN 2721-4796 (Online), 3(2), 1825–1831. https://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jcm/article/view/2417

Kasim, M. R., & Gunawan, A. B. (2022). Evaluasi Skala Pelayanan dan Rencana Penambahan Halte untuk Pengembangan Transportasi Multimoda di Kota Makassar. Jurnal Teknik Sipil, 29(1), 99–106. https://doi.org/10.5614/JTS.2022.29.1.10

Kasim, M. R., & Jihad, A. (2024). Analisis Integrasi Angkutan Kota sebagai Feeder Angkutan Bus Trans Mamminasata Berdasarkan Tujuan dan Sebaran Pergerakan. Jurnal Kridatama Sains Dan Teknologi, 6(01), 99–112. https://doi.org/10.53863/KST.V6I01.1015

Kasim, M. R., Akram, A. M., Ramadhan, R., & Fauzan, A. (2023). Analisis Integrasi Angkutan Kota sebagai Feeder Angkutan Bus Trans Mamminasata. Syntax Literate ; Jurnal Ilmiah Indonesia, 8(6), 3962–3974. https://doi.org/10.36418/SYNTAX-LITERATE.V8I6.12441

Kasim, M. R., Alifuddin, A., Maruddin, M., & Burhanuddin, M. S. (2023). PENGARUH PARKIR ON STREET TERHADAP DERAJAT KEJENUHAN JALAN KH RAMLI KOTA MAKASSAR. Menara: Jurnal Teknik Sipil, 18(2), 87–95. https://doi.org/10.21009/JMENARA.V18I2.35495

Kasim, M. R., Anies, M. K., & Springfield, D. (2021). Parking and Queue Analysis (Case study : New Sport Center in Kepanjen, Malang Regency). International Journal of Innovative Science and Research Technology , 6(7).

Kasim, M. R., Waloejo, B. S., & Agustin, I. W. (2019). Comparative Study of BRT and Multimodal Transportation in Makassar City and Rio de Jenairo City. International Journal of Innovative Science and Research Technology , 4(12).

Kasim, M. R., Wicaksono, A. D., & Kurniawan, E. B. (2017). The integration level of public transportation in Makassar City. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 70(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/70/1/012021

Lagaligo, D., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2022). Pengaruh Temperatur Pemadatan pada Campuran Beton Aspal (AC-WC) dengan Bahan Tambah Karet Alam terhadap Ketahanan Deformasi dan Kuat Tarik Tidak Langsung. Konstruksi, 1(11), 23–36.

Lia, N., & Purwo, M. (2017). Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Aplikasi Kenpave. 1–10.

Marzuki, M. (2023). Analisis Kinerja pada Ruas Jalan Samratulangi dan Jalan M. Supratman Kota Kendari Sulawesi Tenggara. Jurnal Flyover, 3(2), 96–108. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I2.1635

Massara, A., Arifin, W., Alifuddin, A., Ramadhan, M. F., & Taufiq, M. (2021). Analisa Deformasi pada Campuran Aspal Beton Menggunakan Derbo dan Wetfix. PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik, 6(2), 61. https://doi.org/10.51557/pt_jiit.v6i2.681

Misdawati, Said, L. B., & H, S. M. (2021). Analisis Penurunan Umur Rencana Jalan Akibat Volume Kendaraan dan Kelebihan Muatan Pada Ruas Jalan Jend. Ahmad Yani Kota Parepare. Jurnal Flyover, 1(2), 38–47. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I2.749

Mulyo, S. A., Said, L. B., & H, S. M. (2023). Analisis Pemeliharaan Jalan Nasional dengan Metode Bina Marga dan PCI Pada Ruas Jalan Slamet Riyadi Kota Samarinda. Jurnal Flyover, 3(1), 51–59. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I1.1508

Rachman, R. (2023). Kajian Pengaruh Bukaan Median U-Turn Terhadap Kemacetan pada Ruas Jalan Botoambari Kota Baubau Provinsi Sulawesi Tenggara. Jurnal Flyover, 3(2), 85–95. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I2.1634

Said, L. B., Syarkawi, M. T., & Satriawan, K. (2023). Analisis Tingkat Pelayanan Ruas Jalan Lempake – Sambera Akibat Dampak Pembangunan Bandara Sei Siring Kota Samarinda. Jurnal Flyover, 3(1), 45–50. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I1.1507

Suminar, L., Kasim, M. R., & Tasywiq, A. M. M. (2024). Measuring urban walkability index in Surakarta historic district to promote sustainable mobility. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1394(1), 012034. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1394/1/012034

Sutanto, E., H, S. M., & Massara, A. (2023). Analisis Kinerja Angkutan Antar Kota Dalam Provinsi (AKDP) Samarinda-Balikpapan pada Masa Pandemi Covid-19 Berdasarkan Persepsi Penumpang. Jurnal Flyover, 3(1), 29–35. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I1.1505

Syafei, I., Said, L. B., & Adri. (2022). Analisis Persepsi Kepuasan Pengguna Transportasi Udara pada Bandar Udara Sultan Hasanuddin Kota Makassar. Jurnal Flyover, 2(1), 21–28. https://doi.org/10.52103/JFO.V2I1.868

The Asphal Insitute, 1982, Research and Development of the Asphalt Institute"s Thickness Design Manual (MS-1), Research Report Np. 82-2, College Park, Maryland, The Asphalt Institute.

Umar, M. F., Said, L. B., & Syafei, I. (2023). Kajian Kinerja dan Solusi Manajemen Penanggulangan Simpang Tak Bersinyal. Jurnal Flyover, 3(1), 11–18. https://doi.org/10.52103/JFO.V3I1.1469

Wedda, A. A. P., Basri, L., & Alifuddin, A. (2024). Analisis Pemanfaatan Abu Ampas Sagu Terhadap Nilai Karakteristik dan Deformasi Pada Campuran Beton Aspal. Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan, 6(1), 118-130.

Yunus, T. W., H, St. M., & Said, L. B. (2021). Analisis Kinerja Ruas Jalan Akibat Pembangunan Saluran dan Trotoar Pada Kawasan Jalan Nusantara dan Jalan Sulawesi. Jurnal Flyover, 1(1), 33–40. https://doi.org/10.52103/JFO.V1I1.659