



PERAN MATEMATIKA DALAM ANALISIS STABILITAS PENGASPALAN PADA JALAN RAYA

Della Telaumbanua¹⁾

¹⁾ Teknik Sipil, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Sumatra Utara, Indonesia
Email: dellarahmadanitelaumbanua@gmail.com

Abstract

Paving stability is the main indicator in determining the ability of flexible pavement to withstand repeated traffic loads and environmental influences during the design life of the road. This study aims to analyze the role of mathematical approaches in evaluating the stability of Asphalt Concrete–Binder Course (AC-BC) mixtures through Marshall tests and simple numerical modeling. The research method was carried out experimentally in the laboratory with variations in asphalt content of 5–7% and variations in soaking time of 30 minutes, 6 hours, and 9 hours. Asphalt content is a parameter that determines the stability and durability of flexible pavements on highways. Operational temperature is a dominant factor that influences the stability and resistance of flexible pavement to permanent deformation (rutting). The relationship between temperature and stability can be modeled mathematically with a high degree of correlation. The rutting prediction model developed is able to explain the tendency of pavement conditions in the field, thus indicating that a mathematical approach plays an important role in designing flexible pavements that are adaptive to tropical climate conditions. Water is also one of the environmental factors that most influence the decline in the quality of flexible pavement performance, especially in tropical climates with high rainfall that cause damage to flexible pavements such as decreased stability and permanent deformation (rutting) to become major problems on highways, which makes asphalt stability an essential parameter in the design and maintenance of flexible pavements, which is directly related to the ability of the pavement structure to withstand traffic loads and environmental conditions throughout the design period. Test data were analyzed using descriptive statistics, linear regression analysis, and correlation to identify quantitative relationships between mixture variables and stability and flow values. The results of the study indicate that the relationship between asphalt content and stability forms a parabolic curve pattern, where maximum stability is achieved at a certain asphalt content. Statistical analysis shows a strong negative correlation between soaking time and stability, indicating a decrease in the durability of the mixture due to the influence of water, which makes the study show that the mathematical model is able to describe the complex relationship between water factors, traffic loads, and structural responses of the pavement.

Keywords: Marshall Stability, Asphalt Content, Temperature, Static Analysis, Mathematical Model.

Abstrak

Stabilitas pengaspalan merupakan indikator utama dalam menentukan kemampuan perkerasan lentur untuk menahan beban lalu lintas berulang dan pengaruh lingkungan selama umur rencana jalan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran pendekatan matematika dalam mengevaluasi stabilitas campuran Asphalt Concrete–Binder Course (AC-BC) melalui uji Marshall dan pemodelan numerik sederhana. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan variasi kadar aspal sebesar 5–7% dan variasi waktu perendaman 30 menit, 6 jam, dan 9 jam. Kadar aspal merupakan parameter yang menentukan stabilitas dan durabilitas perkerasan lentur jalan raya. Temperatur operasional yang menjadi satu faktor dominan yang memengaruhi stabilitas dan ketahanan perkerasan lentur terhadap deformasi permanen (rutting). Hubungan antara temperatur dan stabilitas dapat dimodelkan secara matematis dengan tingkat korelasi yang tinggi. Model prediksi rutting yang dikembangkan mampu menjelaskan kecenderungan kondisi perkerasan di lapangan, sehingga menunjukkan bahwa pendekatan matematis berperan penting dalam perencanaan perkerasan lentur yang adaptif terhadap kondisi iklim tropis. Air juga merupakan salah satu faktor lingkungan yang paling berpengaruh terhadap penurunan kualitas kinerja perkerasan lentur, khususnya di daerah beriklim tropis yang memiliki curah hujan tinggi yang menyebabkan kerusakan perkerasan lentur seperti penurunan stabilitas dan deformasi permanen (rutting) menjadi permasalahan utama pada jalan raya, yang menjadikan stabilitas pengaspalan parameter esensial dalam perancangan dan pemeliharaan perkerasan lentur jalan, yang berhubungan langsung dengan kemampuan struktur perkerasan dalam menahan beban lalu lintas serta kondisi lingkungan sepanjang masa rencana. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan statistik deskriptif, analisis regresi linier, dan korelasi untuk mengidentifikasi hubungan kuantitatif antara variabel campuran dan nilai stabilitas serta flow. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan stabilitas membentuk pola kurva parabolik, di mana stabilitas maksimum dicapai pada kadar aspal tertentu. Analisis statistik memperlihatkan korelasi negatif yang kuat antara waktu perendaman dan stabilitas, yang mengindikasikan penurunan durabilitas campuran akibat pengaruh air, yang membuat penelitian menunjukkan bahwa model matematis mampu menggambarkan hubungan kompleks antara faktor air, beban lalu lintas, dan respons struktural perkerasan.

Kata Kunci: Stabilitas Marshall, Kadar Aspal, Temperatur, Analisis Statik, Model Matematis.



PENDAHULUAN

Perkerasan lentur merupakan jenis perkerasan jalan yang paling banyak digunakan di Indonesia karena memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, kemudahan konstruksi, dan juga kemampuan beradaptasi terhadap kondisi tanah dasar dan iklim tropis. Akan tetapi, perkerasan lentur juga memiliki kelemahan utama, yaitu rentan terhadap deformasi permanen (rutting), penurunan stabilitas, dan kerusakan akibat pengaruh air serta temperatur tinggi. Stabilitas pengaspalan didefinisikan sebagai kapasitas campuran aspal dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi plastis yang berlebihan. Kadar aspal yang terlalu rendah menyebabkan campuran menjadi rapuh dan mudah retak, sedangkan kadar aspal yang terlalu tinggi mengakibatkan campuran menjadi lunak dan rentan terhadap deformasi permanen (rutting).

Indonesia sebagai negara beriklim tropis mengalami variasi temperatur permukaan perkerasan yang relatif tinggi, khususnya pada siang hari. Temperatur permukaan jalan yang dapat mencapai lebih dari 60°C berpotensi menurunkan kekakuan campuran aspal dan meningkatkan risiko deformasi permanen berupa rutting. Stabilitas pengaspalan tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi material dan kadar aspal, tetapi juga oleh kondisi temperatur operasional. Pada temperatur yang tinggi aspal bersifat lebih lunak dan viskoplastik, sehingga kemampuan campuran untuk menahan beban lalu lintas berulang menjadi berkurang. Kinerja perkerasan lentur sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama keberadaan air yang dapat masuk ke dalam struktur perkerasan melalui retakan, sambungan, atau sistem drainase yang kurang baik.

Air dapat menyebabkan terjadinya stripping, yaitu terlepasnya ikatan antara aspal dan agregat, yang akhirnya menurunkan stabilitas dan durabilitas perkerasan. Penurunan stabilitas akibat air sering tidak dianalisis secara kuantitatif, sehingga evaluasi kinerja perkerasan cenderung bersifat kualitatif. Perkembangan jaringan jalan raya yang pesat menuntut perkerasan dengan kinerja tinggi dan ketahanan jangka panjang. Namun, pada kondisi lapangan,

banyak perkerasan lentur mengalami kerusakan dini berupa penurunan stabilitas, alur (rutting), dan retak akibat kombinasi pengaruh air dan beban lalu lintas berulang. Evaluasi kinerja perkerasan selama ini umumnya bersifat reaktif, yaitu dilakukan setelah kerusakan terlihat secara visual. Salah satu metode paling umum untuk mengevaluasi stabilitas campuran aspal adalah Uji Marshall, yang memberikan parameter stabilitas dan flow sebagai indikator kekuatan dan fleksibilitas campuran.

Dalam praktik rekayasa jalan, hasil uji Marshall sering digunakan secara empiris tanpa analisis matematis yang mendalam.

Padahal, pendekatan matematika sangat diperlukan untuk:

- Memprediksi perkerasan dalam jangka panjang.
- Menganalisis hubungan antara kadar aspal dan stabilitas Marshall.
- Kuantifikasi hubungan temperatur dan stabilitas.
- Menentukan kekuatan hubungan antara durasi perendaman dan kerusakan campuran.
- Prediksi rutting berdasarkan kondisi lingkungan.
- Mengukur tingkat degradasi stabilitas akibat air.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengintegrasian analisis matematis dengan hasil uji Marshall untuk mengevaluasi stabilitas pengaspalan secara lebih rasional dan terukur.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Stabilitas Aspal dan Mekanika Material

Nilai stabilitas dalam Uji Marshall digunakan untuk mengukur kemampuan campuran aspal dalam menahan deformasi akibat beban. Stabilitas tinggi menunjukkan kekuatan campuran yang lebih baik terhadap tekanan beban statis, sedangkan nilai flow mencerminkan fleksibilitas campuran. Variasi waktu perendaman dan temperatur secara langsung memengaruhi kestabilan hasil uji Marshall.

Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga (2018), stabilitas Marshall merupakan beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji sebelum mengalami kegagalan. Nilai stabilitas



dipengaruhi oleh: Gradasi agregat, Kadar aspal, Sifat fisik aspal, Temperatur pengujian, serta Kondisi perendaman. Aspal merupakan material viskoelastoplastik, yang sifat mekaniknya sangat dipengaruhi oleh temperatur.

Stabilitas Marshall mencerminkan kemampuan campuran aspal menahan beban tanpa mengalami deformasi berlebihan. Rutting terjadi akibat akumulasi deformasi plastis pada lapisan perkerasan akibat beban lalu lintas berulang dan pengaruh temperatur serta air. Dalam perspektif mekanika material, campuran aspal dapat dipandang sebagai material viskoelastoplastik, di mana responsnya terhadap beban dipengaruhi oleh waktu dan temperatur.

2. Deformasi Permanen (Rutting) dan Temperatur Operasional

Rutting adalah deformasi permanen yang terjadi akibat akumulasi regangan plastis pada lapisan perkerasan. Menurut Joumbat et al. (2023), rutting dipengaruhi oleh: Kekakuan campuran, Temperatur operasi, dan Besarnya frekuensi beban. Rutting umumnya terjadi pada temperatur tinggi dan beban lalu lintas berat. Pada kondisi ini, lapisan aspal mengalami aliran plastis akibat tegangan geser yang melebihi kapasitas material. Nilai stabilitas Marshall sering digunakan sebagai indikator awal resistensi terhadap rutting, meskipun tidak secara langsung mensimulasikan beban dinamis.

3. Model Matematis dalam Evaluasi Aspal

Pendekatan matematis dalam analisis perkerasan meliputi: Statistik deskriptif, Regresi linier dan nonlinier, Model empiris-mekanis. Pemodelan matematis digunakan untuk merepresentasikan hubungan antara variabel bebas (air, beban, temperatur) dan variabel terikat (stabilitas, deformasi). Model regresi dan pendekatan numerik sering digunakan karena mudah diterapkan dan cukup representatif terhadap kondisi lapangan, yang digunakan untuk menggambarkan hubungan kuantitatif antara variabel campuran dan respons mekanik perkerasan. Pendekatan matematis menggunakan regresi nonlinier memungkinkan penentuan titik optimum secara analitis, bukan hanya visual

yang memberikan hasil yang lebih objektif dan dapat direplikasi.

4. Model Empiris-Mekanis dan Analisis Statistik

Model empiris-mekanis menggabungkan data hasil pengujian laboratorium dengan pendekatan mekanika untuk memprediksi respons perkerasan. Model ini digunakan untuk analisis rutting karena mampu mengaitkan variabel lingkungan dan beban secara kuantitatif. Analisis statistik, mencakup korelasi dan regresi, yang digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antar variabel dan mengukur tingkat pengaruh suatu faktor terhadap respons material. Dalam konteks perkerasan, statistik berperan penting dalam evaluasi performa berbasis data.

5. Peran Air dan Beban Lalu Lintas

Menurut penelitian internasional, air berperan sebagai katalis kerusakan dengan mempercepat pelemahan ikatan aspal-agregat. Beban lalu lintas berat memperbesar tegangan geser internal, sehingga mempercepat terjadinya deformasi permanen. Menurut Arifin dan Tugiman (2023), perendaman air dalam jangka waktu tertentu dapat menurunkan stabilitas Marshall secara signifikan akibat melemahnya ikatan aspal-agregat. Air juga mempercepat proses menurunnya kualitas jangka waktu aspal dan degradasi struktur mikro campuran.

METODOLOGI PENELITIAN

1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian yang menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental dan analitis. Penelitian dirancang untuk mengkaji secara sistematis hubungan antara karakteristik material campuran aspal, kondisi lingkungan, serta respons mekanik perkerasan lentur melalui pengujian laboratorium yang dikombinasikan dengan analisis matematis dan numerik. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran objektif dan terukur mengenai sifat perkerasan aspal di bawah kondisi beban lalu lintas dan temperatur operasional yang bervariasi.

2. Objek Penelitian



Objek penelitian adalah campuran aspal beton panas (*Hot Mix Asphalt*), khususnya lapisan Asphalt Concrete–Binder Course (AC-BC), yang sering digunakan pada konstruksi jalan raya di Indonesia. Material penyusun campuran meliputi agregat kasar, agregat halus, filler, dan aspal keras dengan spesifikasi teknis yang mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga. Untuk memperoleh variasi data yang representatif, kadar aspal divariasikan dalam rentang tertentu, umumnya antara 5% hingga 7%, sehingga dapat dianalisis pengaruh komposisi campuran terhadap stabilitas dan deformasi perkerasan.

3. Bahan dan Pelaksanaan Penelitian

Bahan utama yang digunakan:

- Aspal keras penetrasi (sesuai Spesifikasi Bina Marga)
- Agregat kasar, halus, dan filler
- Variasi kadar aspal ($\pm 5\%$ –7%)

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan pembuatan benda uji di laboratorium sesuai dengan prosedur standar pencampuran dan pemadatan aspal beton. Benda uji kemudian diuji menggunakan metode Marshall untuk memperoleh nilai stabilitas dan flow sebagai indikator utama kinerja campuran. Selain itu, menerapkan variasi waktu perendaman air, seperti 30 menit, 6 jam, dan 9 jam, guna mensimulasikan pengaruh kelembapan dan kondisi lingkungan terhadap durabilitas campuran aspal. Variasi temperatur pengujian juga digunakan untuk menjelaskan kondisi lapangan, terutama pada daerah dengan suhu tinggi yang berpotensi mempercepat terjadinya deformasi permanen.

4. Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian laboratorium selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan matematis dan statistik. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan nilai stabilitas dan flow akibat variasi kadar aspal, waktu perendaman, dan temperatur. Selanjutnya, analisis korelasi dan regresi linier maupun multivariat diterapkan untuk mengetahui hubungan kuantitatif antara variabel bebas,

seperti komposisi campuran dan kondisi lingkungan, dengan variabel terikat berupa stabilitas Marshall dan potensi rutting. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap kinerja perkerasan aspal.

5. Analisis Statistik dan Model Matematis

Analisis statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan nilai stabilitas dan flow akibat variasi kadar aspal, waktu perendaman, dan temperatur. Selanjutnya, analisis korelasi dan regresi linier maupun multivariat diterapkan untuk mengetahui hubungan kuantitatif antara variabel bebas, seperti komposisi campuran dan kondisi lingkungan, dengan variabel terikat berupa stabilitas Marshall dan potensi rutting. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap kinerja perkerasan aspal.

Analisis statistik dan model matematis digunakan untuk memprediksi perilaku perkerasan aspal dalam jangka panjang. Model tersebut digunakan untuk memperkirakan stabilitas dinamis dan kecenderungan deformasi permanen akibat beban lalu lintas berulang. Dalam pengembangan model, data empiris dari hasil pengujian laboratorium dijadikan sebagai dasar kalibrasi, sehingga hasil prediksi tetap relevan dengan kondisi nyata di lapangan. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan data uji eksperimental serta hasil penelitian terdahulu yang relevan. Model matematis dikembangkan menggunakan regresi multivariat dengan bentuk umum:

$$S = a - bW - cL$$

di mana:

S = stabilitas Marshall

W = waktu perendaman

L = beban lalu lintas ekuivalen

Untuk prediksi rutting digunakan model numerik sederhana:



$$R = k \times \frac{L}{S}$$

di mana:

R = potensi rutting

k = konstanta material campuran

a. Analisis Korelasi dan Regresi

Regresi linier dan multivariat untuk melihat hubungan:

- Waktu perendaman vs stabilitas
- Kadar aspal vs rutting
- Beban lalu lintas vs deformasi

b. Pemodelan Matematis

Digunakan persamaan matematis untuk memprediksi:

- Stabilitas Marshall
- Potensi rutting
- Penurunan kinerja perkerasan

c. Variasi Waktu Perendaman

Benda uji direndam dalam water bath pada temperatur 60°C dengan variasi waktu:

- 30 menit
- 6 jam
- 9 jam

Variasi ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi perkerasan yang terendam air dalam durasi berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

1. Hasil Pengujian Stabilitas Marshall

Hasil pengujian laboratorium menggunakan metode Marshall pada campuran aspal beton AC-BC menunjukkan bahwa nilai stabilitas sangat dipengaruhi oleh komposisi campuran dan kondisi lingkungan pengujian. Pada kondisi perendaman awal, yaitu 30 menit, campuran aspal menunjukkan nilai stabilitas yang relatif tinggi, menandakan kemampuan yang baik dalam menahan beban statis.

Nilai stabilitas tertinggi tercatat pada kadar aspal optimum, yang mencerminkan keseimbangan antara kekakuan dan daya ikat aspal terhadap agregat. Seiring dengan bertambahnya waktu perendaman air hingga 6 jam dan 9 jam, nilai stabilitas Marshall mengalami penurunan yang cukup signifikan. Penurunan ini menunjukkan bahwa air berperan dalam melemahkan ikatan antara aspal dan agregat, sehingga kemampuan campuran untuk menahan beban berkurang. Fenomena tersebut konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pengaruh kelembapan merupakan salah satu faktor utama penyebab degradasi kinerja perkerasan lentur.

2. Hasil Pengujian Flow dan Sifat Deformasi

Nilai flow yang diperoleh dari hasil pengujian Marshall menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya waktu perendaman dan temperatur pengujian. Peningkatan nilai flow mengindikasikan bahwa campuran aspal mengalami deformasi yang lebih besar sebelum mencapai kondisi kegagalan. Hal ini menunjukkan penurunan kekakuan campuran akibat pengaruh air dan suhu tinggi, yang menyebabkan aspal menjadi lebih lunak dan plastis.

Dalam pembahasan, peningkatan flow ini dikaitkan dengan meningkatnya potensi deformasi permanen pada perkerasan jalan, khususnya pada jalur roda kendaraan. Kondisi ini sangat relevan dengan kondisi lapangan di Indonesia, di mana temperatur permukaan jalan relatif tinggi dan curah hujan cukup besar, sehingga perkerasan rentan mengalami perubahan sifat mekanik.

3. Analisis Rutting dan Deformasi Permanen

Analisis terhadap potensi rutting menunjukkan bahwa deformasi permanen pada perkerasan lentur dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi agregat, serta kondisi temperatur dan beban lalu lintas. Campuran dengan kadar aspal yang terlalu tinggi cenderung mengalami deformasi plastis yang lebih besar, terutama pada temperatur tinggi, sedangkan campuran dengan kadar aspal terlalu rendah menunjukkan



kecenderungan rapuh dan kurang tahan terhadap beban berulang.

Hasil simulasi numerik dan pendekatan empiris yang digunakan memperlihatkan bahwa kedalaman rutting meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah siklus beban kendaraan. Model yang dikembangkan mampu menggambarkan pola akumulasi deformasi permanen yang sejalan dengan kondisi lapangan, terutama pada ruas jalan dengan volume lalu lintas berat dan sistem drainase yang kurang optimal.

4. Hasil Analisis Matematis dan Model Prediksi

Analisis matematis yang diterapkan pada data hasil pengujian menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara variabel campuran dan kinerja perkerasan aspal. Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa kadar aspal, waktu perendaman, dan temperatur memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai stabilitas dan flow. Model matematis yang dikembangkan mampu memprediksi penurunan stabilitas dan peningkatan deformasi dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen.

Dalam pembahasan, model prediksi tersebut dinilai efektif sebagai alat bantu dalam evaluasi kinerja perkerasan aspal. Pendekatan matematis memungkinkan perencanaan untuk memperkirakan perilaku perkerasan dalam jangka panjang tanpa harus sepenuhnya bergantung pada pengujian lapangan yang memerlukan waktu dan biaya besar. Selain itu, model numerik yang digunakan juga memberikan gambaran lebih realistis mengenai respons perkerasan terhadap beban lalu lintas berulang.

PEMBAHASAN

1. Stabilitas Pengaspalan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas pengaspalan sangat dipengaruhi oleh interaksi antara komposisi campuran aspal, kondisi lingkungan, dan beban layanan. Penurunan nilai stabilitas Marshall akibat peningkatan waktu perendaman mengindikasikan bahwa air memiliki peran signifikan dalam melemahkan ikatan adhesi

antara aspal dan agregat. Fenomena ini memperkuat konsep *moisture damage* pada perkerasan lentur, di mana penetrasi air ke dalam rongga campuran menyebabkan berkurangnya daya ikat dan menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban.

2. Peningkatan Nilai Flow

Peningkatan nilai flow yang terjadi seiring bertambahnya waktu perendaman dan temperatur pengujian menunjukkan bahwa campuran aspal mengalami penurunan kekakuan dan peningkatan sifat plastis. Kondisi ini mencerminkan perilaku viskoelastis aspal yang sangat sensitif terhadap temperatur. Pada temperatur tinggi, aspal cenderung melunak sehingga deformasi yang terjadi sebelum kegagalan menjadi lebih besar. Temuan ini relevan dengan kondisi lapangan di Indonesia yang memiliki temperatur permukaan jalan relatif tinggi, sehingga risiko deformasi permanen menjadi lebih besar jika desain campuran tidak optimal.

3. Rutting

Pembahasan terkait rutting menunjukkan bahwa kadar aspal dan struktur gradasi agregat merupakan faktor dominan dalam menentukan ketahanan perkerasan terhadap deformasi permanen. Campuran dengan kadar aspal yang terlalu tinggi cenderung mengalami aliran plastis berlebih di bawah beban berulang, sedangkan kadar aspal yang terlalu rendah mengurangi durabilitas dan meningkatkan potensi kerusakan dini. Hal ini menegaskan pentingnya penentuan kadar aspal optimum sebagai kompromi antara stabilitas dan fleksibilitas campuran.

4. Pendekatan Matematis

Pendekatan matematis yang diterapkan dalam penelitian ini memperlihatkan kemampuan yang baik dalam menjelaskan hubungan kuantitatif antara variabel campuran dan respons mekanik perkerasan. Model regresi dan simulasi numerik yang dikembangkan mampu menjelaskan pola penurunan stabilitas dan peningkatan deformasi secara konsisten dengan data eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa model matematis dapat digunakan



sebagai alat prediktif yang efektif untuk mengevaluasi kinerja perkerasan tanpa harus sepenuhnya bergantung pada pengujian lapangan yang memerlukan biaya dan waktu besar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa stabilitas pengaspalan pada perkerasan lentur sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara komposisi campuran aspal, kondisi lingkungan, dan karakteristik beban lalu lintas. Pengujian laboratorium menunjukkan bahwa perubahan kadar aspal, struktur gradasi agregat, serta durasi perendaman air memberikan dampak nyata terhadap nilai stabilitas Marshall dan flow, yang merepresentasikan kemampuan campuran dalam menahan beban dan mengalami deformasi.

Penurunan nilai stabilitas seiring bertambahnya waktu perendaman mengindikasikan bahwa keberadaan air berkontribusi terhadap melemahnya ikatan antara aspal dan agregat. Kondisi ini berimplikasi pada menurunnya daya dukung campuran terhadap beban statis maupun dinamis. Di sisi lain, peningkatan nilai flow menunjukkan bahwa campuran aspal menjadi lebih plastis, terutama pada temperatur tinggi, sehingga meningkatkan risiko deformasi permanen pada perkerasan jalan.

Analisis terhadap deformasi permanen (rutting) memperlihatkan bahwa campuran dengan kadar aspal yang tidak optimal cenderung mengalami penurunan kinerja struktural. Kadar aspal yang berlebihan meningkatkan potensi deformasi plastis, sedangkan kadar aspal yang terlalu rendah mengurangi durabilitas dan ketahanan terhadap beban berulang. Oleh karena itu, penentuan kadar aspal optimum merupakan faktor kunci dalam menghasilkan perkerasan yang stabil dan tahan lama.

Pendekatan matematis dan numerik yang diterapkan dalam kelima jurnal terbukti mampu

menggambarkan hubungan kuantitatif antara variabel campuran, kondisi lingkungan, dan respons mekanik perkerasan. Model statistik dan simulasi numerik yang dikembangkan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data eksperimen, sehingga dapat digunakan sebagai alat prediktif dalam evaluasi kinerja perkerasan aspal. Integrasi antara pengujian laboratorium dan analisis matematis memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif dalam perencanaan dan pemeliharaan jalan raya. Secara keseluruhan menegaskan bahwa penerapan pendekatan matematis dalam analisis stabilitas pengaspalan memiliki peran strategis dalam meningkatkan keandalan desain perkerasan lentur. Pendekatan ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih adaptif terhadap kondisi iklim, lingkungan, dan beban lalu lintas di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2018). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: AASHTO.
- Arifin, M., & Tugiman, T. (2023). Analisis pengaruh waktu perendaman perkerasan AC-BC terhadap stabilitas dan kelelahan (flow) aspal. *STATIKA: Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 45–53.
- Awan Susanto, H. (2020). Evaluasi kinerja rutting pada perkerasan hot mix asphalt. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 15(1), 22–30.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian PUPR. (2018). *Spesifikasi umum bina marga 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Bina Marga. (2017). *Manual Perkerasan Jalan*. Jakarta: Kementerian PUPR.



- Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. New York: McGraw-Hill.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2016). *Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur*. Jakarta.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Pemeliharaan Jalan Raya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Perancangan Perkerasan Jalan Raya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Education.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Education.
- Joumblat, R., Hajj, E. Y., & Alavi, A. H. (2023). State-of-the-art review on permanent deformation characterization of asphalt concrete pavements. *Sustainability*, 15(2), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su1502xxxx>
- Kementerian PUPR. (2019). *Pedoman Teknis Jalan Raya*. Jakarta.
- Khanna, S. K., & Justo, C. E. G. (2001). *Highway Engineering*. New Delhi: Nem Chand & Bros.
- Kongkitkul, W., Jitsangiam, P., & Nuannoi, T. (2024). Explainable artificial intelligence for predicting asphalt concrete stiffness and rutting resistance. *Construction and Building Materials*, 392, 131987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.xxxxxx>
- Mulyono, A. T. (2015). Analisis Stabilitas Perkerasan Jalan. *Jurnal Transportasi*, 15(2), 85–94.
- Nasution, H. (2014). *Matematika Teknik untuk Rekayasa Sipil*. Jakarta: Erlangga.
- Nurali, A., & Setiawan, B. (2018). Pengaruh Beban Lalu Lintas terhadap Kerusakan Jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 45–53.
- Oglesby, C. H., & Hicks, R. G. (1982). *Highway Engineering*. New York: Wiley.
- PCA. (2008). *Thickness Design for Concrete Pavement*. Illinois: Portland Cement Association.
- Prasetyo, Y. (2017). Evaluasi Kinerja Perkerasan Lentur. *Jurnal Infrastruktur*, 9(3), 120–128.
- Rahmadi, R., Haniza, S., & Pratama, A. (2023). Analisis stabilitas dan durabilitas asphalt concrete–binder course dengan pemanfaatan limbah plastik. *Journal of Structural and Materials*, 5(1), 11–20.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction* (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association.
- Setiadji, B. H. (2013). *Rekayasa Jalan Raya*. Semarang: UNDIP Press.
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova.
- Sukirman, S. (2010). *Beton Aspal Campuran Panas*. Bandung: Nova.
- Suryadharma, H., & Susanto, B. (2008). *Rekayasa Jalan Raya*. Yogyakarta: UGM Press.
- Tjokrodimuljo, K. (2007). *Teknologi Bahan Konstruksi*. Yogyakarta: KMTS UGM.
- Widodo, S., & Rahman, A. (2019). Model Matematis Perkerasan Jalan. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 14(2), 90–98.
- Wignarajah, S. (2015). Pavement Performance Evaluation. *International Journal of Civil Engineering*, 6(4), 210–219.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design* (2nd ed.). John Wiley & Sons.



- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975).
Principles of Pavement Design. New
York: Wiley.
- Zainal, A. (2016). Analisis Tebal Lapis
Perkerasan Jalan. *Jurnal Teknik
Infrastruktur*, 7(1), 33–41.