ANALISIS KINERJA VOLUMETRIK DAN RUTTING CAMPURAN ASPAL PG76 DENGAN FLY ASH SEBAGAI PENGISI

(Volumetric Performance Analysis and Rutting of PG76 Asphalt Mixture with Fly Ash as Filler)

Hermon Frederik Tambunan[1], Bernaditha Catur Marina[1], Boy Sipayung[1]
[1]Civil Engineering Study Program, Faculty of Infrastructure and Regional Technology, Sumatra Institute of Technology
Email: hermon.tambunan@si.itera.ac.id

Diterima 14 Januari 2026, Disetujui 27 April 2026

ABSTRAK

Campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt/HMA*) pada lapis aus (*Asphalt Concrete–Wearing Course/AC-WC*) rentan mengalami deformasi permanen (*rutting*), terutama akibat pengaruh suhu tinggi, karakteristik agregat, dan jenis bahan pengikat. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan binder aspal Penetration 60/70 dan Performance Grade (PG) 76 dengan penambahan fly ash (FA) sebagai filler terhadap kinerja volumetrik dan kinerja rutting campuran AC-WC. Evaluasi dilakukan melalui analisis parameter volumetrik Marshall (VIM, VMA, dan VFB), stabilitas Marshall, *Index of Retained Strength* (IRS), serta parameter deformasi permanen pada variasi suhu uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan binder PG76 memiliki nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) lebih rendah, yaitu 6,5%, dibandingkan campuran Pen 60/70 sebesar 6,6%, yang mengindikasikan efisiensi penggunaan aspal. Analisis volumetrik menunjukkan bahwa penambahan fly ash memberikan korelasi kuat terhadap perubahan VIM, VMA, dan VFB dengan nilai koefisien korelasi > 0,7, yang menandakan peran signifikan FA dalam memperbaiki struktur internal campuran. Dari sisi kinerja mekanis, campuran PG76 + FA menghasilkan stabilitas Marshall sebesar 1686,04 kg, lebih tinggi dibandingkan campuran Pen 60/70 + FA sebesar 1407,58 kg. Ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembaban meningkat signifikan dengan penambahan fly ash, yang ditunjukkan oleh nilai IRS > 90% pada kedua jenis binder. Dari sisi kinerja rutting, campuran PG76 FA menunjukkan stabilitas dinamis lebih tinggi dan tingkat deformasi lebih rendah, terutama pada suhu tinggi. Secara keseluruhan, kombinasi fly ash sebagai filler dan binder PG76 terbukti lebih efektif dalam meningkatkan kinerja volumetrik dan ketahanan rutting AC-WC, sehingga berpotensi diterapkan pada pekerjaan overlay untuk kondisi lalu lintas berat dan iklim tropis.

Kata Kunci: AC-WC, fly ash, PG76, Pen 60/70, kinerja volumetrik, *rutting, overlay*

ABSTRACT

Hot Mix Asphalt (HMA) used in the Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) layer is susceptible to permanent deformation (rutting), particularly due to high service temperatures, aggregate characteristics, and binder properties. This study aims to evaluate the effect of binder type, namely Penetration 60/70 asphalt and Performance Grade (PG) 76 asphalt, combined with fly ash (FA) as a filler, on the volumetric and rutting performance of AC-WC mixtures. The evaluation was conducted through Marshall volumetric parameters (VIM, VMA, and VFB), Marshall stability, Index of Retained Strength (IRS), and permanent deformation parameters under various testing temperatures. The results indicate that the mixture with PG76 binder exhibits a lower Optimum Asphalt Content (OAC) of 6.5% compared to 6.6% for the Pen 60/70 mixture, indicating higher binder efficiency. Volumetric analysis shows that the addition of fly ash has a strong correlation with changes in VIM, VMA, and VFB, with correlation coefficients greater than 0.7, highlighting the significant role of FA in improving the internal structure of the asphalt mixture. In terms of mechanical performance, the PG76 + FA mixture achieves a Marshall stability of 1686.04 kg, which is higher than that of the Pen 60/70 + FA mixture at 1407.58 kg. Moisture damage resistance is significantly enhanced by the addition of fly ash, as indicated by IRS values exceeding 90% for both binder types. Rutting performance results show that the PG76 FA mixture exhibits higher dynamic stability and lower permanent deformation, particularly at elevated temperatures. Overall, the combination of fly ash as filler and PG76 binder proves to be more effective in enhancing the volumetric characteristics and rutting resistance of AC-WC mixtures, making it suitable for overlay applications under heavy traffic and tropical climate conditions.

Keywords: *AC-WC, fly ash, PG76, Pen 60/70, volumetric performance, rutting, overlay*

PENDAHULUAN

Deformasi permanen (*rutting*) merupakan salah satu bentuk kerusakan utama yang dialami oleh perkerasan lentur, khususnya pada lapisan aus (*Asphalt Concrete – Wearing Course / AC-WC*) yang menjadi permukaan langsung dari lalu lintas kendaraan berat dan berulang (Tambunan et al., 2025). Kerusakan rutting ditandai dengan terbentuknya alur pada permukaan perkerasan yang disebabkan oleh akumulasi deformasi plastis akibat beban lalu lintas dan suhu layanan tinggi (Alkaissi & Al-Kaissi, 2024). Fenomena ini sangat relevan di negara tropis, seperti Indonesia, di mana temperatur permukaan aspal sering mencapai kondisi yang mempercepat pelunakan binder aspal (Alkaissi & Al-Kaissi, 2024; *International Journal of GEOMATE,Dec., 2025*, n.d.). Kondisi tersebut dapat mengakibatkan turunnya daya dukung struktur perkerasan dan memperpendek masa layanan jalan jika tidak ditangani secara tepat. Oleh karena itu, penelitian mengenai strategi peningkatan ketahanan rutting pada AC-WC sangat penting untuk mendukung performa perkerasan jangka panjang.

Pemilihan jenis binder aspal merupakan salah satu faktor kunci dalam menentukan performa volumetrik dan ketahanan terhadap rutting suatu campuran aspal (Rocha et al., 2024). Aspal konvensional seperti Penetration 60/70 memiliki sifat viskoelastis yang baik pada suhu layanan menengah, tetapi rentan terhadap deformasi permanen ketika diuji pada suhu tinggi dan di bawah beban berulang (Junaid et al., 2018). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, binder jenis Performance Grade (PG) 76 dirancang memiliki nilai kinerja suhu tinggi yang lebih tinggi dan modulus kompleks yang lebih besar dibandingkan aspal konvensional (Jaleel et al., 2025). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan binder PG76 memiliki deformasi permanen yang lebih rendah serta stabilitas dinamis yang lebih tinggi dibandingkan dengan binder konvensional pada kondisi suhu layanan ekstrem (Jaleel et al., 2025). Dengan demikian, keberadaan aspal PG76 dipandang sebagai solusi yang efektif untuk meningkatkan ketahanan rutting pada campuran AC-WC, baik secara mekanis maupun jangka panjang.

Selain binder, filler mineral berperan penting dalam memodifikasi properti volumetrik campuran aspal yang berdampak signifikan terhadap performa mekanik seperti stabilitas dan deformasi permanen (Mirković et al., 2019a). Fly ash (FA) merupakan produk hasil pembakaran batubara yang memiliki partikel halus, bentuk hampir bulat, dan kandungan silika serta alumina yang tinggi, sehingga memiliki potensi sebagai filler alternatif untuk menggantikan filler konvensional (Mirković et al., 2019a). Penelitian menunjukkan bahwa fly ash dapat meningkatkan kepadatan campuran melalui pengisian rongga mikro antara agregat dan binder, sehingga mempengaruhi voids in mix (VIM), voids in mineral aggregate (VMA), dan voids filled with binder (VFB) secara positif (Maghfirah et al., 2024). Interaksi kimia antara fly ash dan binder aspal juga dapat memperkuat ikatan mikrostruktur campuran melalui reaksi pozolanik yang meningkatkan kekuatan internal campuran (Mukhambetkaliyev et al., 2025). Oleh karena itu, pemanfaatan fly ash sebagai filler dipandang tidak hanya sebagai alternatif material ramah lingkungan, tetapi juga sebagai strategi untuk meningkatkan parameter volumetrik campuran aspal.

Kelembaban merupakan faktor lingkungan yang sering menyebabkan kerusakan prematur pada campuran aspal melalui fenomena pelemahan adhesi antara binder dan agregat (Rostampour Sheykhneshin & Hamedi, 2025). Untuk menilai ketahanan campuran terhadap pengaruh kelembaban, parameter Index of Retained Strength (IRS) sering digunakan, yang mengukur perubahan stabilitas campuran sebelum dan setelah perendaman dalam air (Nazal & Ismael, 2019). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penambahan filler aktif seperti fly ash dapat memperbaiki ketahanan kelembaban karena sifat kimia fly ash yang dapat memperkuat ikatan aspal–agregat, sehingga mengurangi hilangnya kohesi akibat paparan air (Zhao et al., 2022). Selain itu, integrasi fly ash dengan binder berkinerja tinggi seperti PG76 melaporkan nilai IRS yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran yang menggunakan binder konvensional seperti Pen 60/70 (Selmi Kaffa et al., 2025). Oleh karena itu, parameter IRS menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kinerja campuran aspal terhadap kelembaban, terutama dalam konteks binder berkinerja tinggi dan filler alternatif.

Berbagai studi tentang penggunaan fly ash dan binder berkinerja tinggi telah memberikan hasil yang menjanjikan secara terpisah, namun hubungan komprehensif antara properti volumetrik, ketahanan kelembaban, dan kinerja rutting dalam satu kerangka uji masih terbatas, khususnya pada aplikasi Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC). Selain itu, meskipun beberapa penelitian telah meneliti binder PG76 dan filler alternatif secara terpisah, kajian langsung yang membandingkan performa campuran PG76 dan Pen 60/70 dengan substitusi fly ash yang berbeda pada variasi suhu layanan belum banyak dilaporkan. Dalam konteks ini, penggunaan fly ash sebagai filler yang dapat memperbaiki distribusi mikrostruktur campuran memberikan peluang untuk meningkatkan performa AC-WC secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi secara eksperimental pengaruh fly ash pada karakteristik volumetrik, ketahanan kelembaban, dan kinerja rutting campuran AC-WC yang menggunakan binder PG76 dan Pen 60/70 pada berbagai suhu layanan, termasuk 25°C, 45°C, dan 60°C. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan dasar teknis yang kuat bagi aplikasi fly ash dan binder berkinerja tinggi dalam desain campuran aspal yang lebih tahan lama dan berdaya guna di berbagai kondisi iklim.EDAC (t) =

METODE

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja rutting campuran aspal panas jenis Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) menggunakan aspal modifikasi PG76 dengan substitusi filler semen portland dengan fly ash (Fa). Metode penelitian ini dirancang

secara eksperimental di laboratorium menggunakan pendekatan uji kinerja, dengan fokus utama pada pengujian deformasi permanen (rutting) pada berbagai suhu layanan. Penentuan karakteristik campuran meliputi persiapan spesimen Marshall, pengujian parameter volumetrik, dan uji kinerja rutting dengan alat Uji Pelacakan Roda (WTM).

Uji Marshall standar adalah tes untuk memperkirakan kinerja campuran berdasarkan volumetrik campuran. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban 50,8 mm/menit. Pemuatan uji Marshall diterapkan sampai campuran gagal. Uji marshall dilakukan dengan merendam spesimen uji dalam bak air selama 30 – 40 menit pada suhu 60ºC (Mathew & Rao, 2006). Stabilitas campuran menunjukkan kemampuan campuran untuk menerima dan menahan beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan. Flow marshall adalah nilai yang menunjukkan deformasi vertikal yang diterima oleh pengujian yang terjadi karena pemuatan hingga kondisi sampel runtuh yang menunjukkan stabilitas maksimum. Tes perendaman marshall adalah tes marshall dengan perendaman 24 jam. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan *Index of Retained Stability (IRS)* yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan tekan campuran aspal di bawah pengaruh kelembaban. Nilai IRS bertujuan untuk menilai ketahanan campuran aspal terhadap kerusakan kelembaban. Kelembaban dapat merusak campuran aspal, yaitu dengan cara hilangnya ikatan antara aspal dengan agregat kasar dan halus.

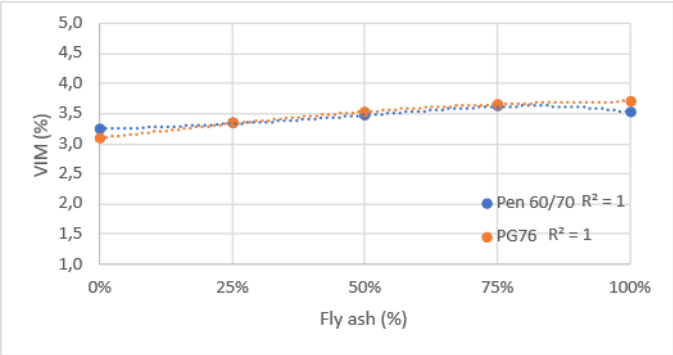
Rutting pada perkerasan jalan dapat diprediksi dengan *pengujian Wheel Tracking Machine (WTM)* , yaitu dengan melakukan pengujian dengan pemuatan berulang. Pengujian dengan alat WTM dilakukan pada suhu 60^0C dengan kecepatan pemuatan 42 kali per menit dan tekanan diberikan 0,7 MPa. Nilai stabilitas yang diperoleh adalah besaran beban roda pelacakan yang menghasilkan deformasi total 1 mm dalam rentang waktu pengujian 45 menit hingga 60 menit(Zou et al., 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian, nilai KAO pada campuran spesimen uji menggunakan pena aspal 60/70 adalah 6,6%. Nilai KAO dalam campuran spesimen uji menggunakan aspal PG76 adalah 6,5%. Perbedaan nilai KAO pada kedua campuran produk uji dengan aspal yang berbeda menunjukkan bahwa penggunaan aspal PG76 dengan nilai KAO yang lebih rendah berarti campuran tersebut dapat lebih efisien dalam hal penggunaan bahan pengikat.

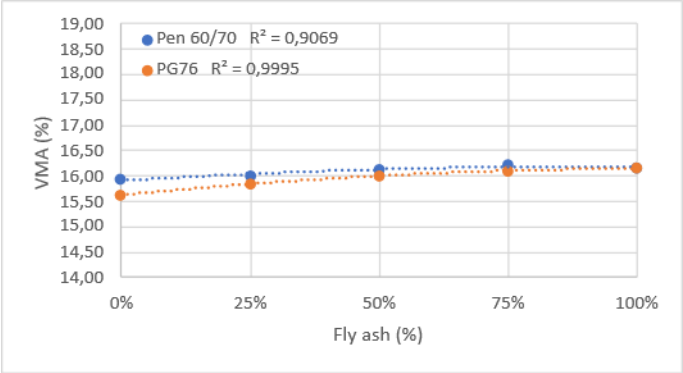
Pengaruh *Fly Ash* (Fa) pada Volumetrik dan Parameter Marshall

Nilai VIM pada campuran aspal pen 60/70 meningkat hingga penambahan Fa pada 75% kemudian menurun, yang mengindikasikan adanya peningkatan kepadatan akibat penambahan Fa sehingga dapat mengurangi rongga udara pada campuran aspal. Sedangkan campuran dengan PG76 mengalami peningkatan linier sampai pada Fa 100%. Perubahan VIM dapat dilihat pada Gambar 1.



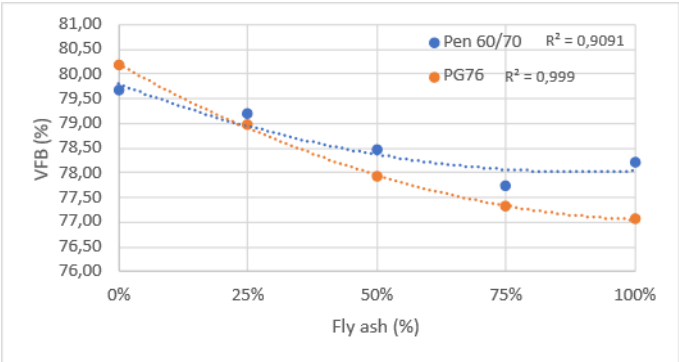
Gambar 1. Nilai VIM pada Campuran

Grafik menunjukkan bahwa peningkatan kadar fly ash dari 0% hingga 100% menyebabkan kenaikan nilai VMA (%) yang konsisten pada campuran AC-WC dengan binder Pen 60/70 maupun PG76, yang mengindikasikan peran fly ash sebagai filler aktif dalam memodifikasi struktur internal campuran. Kenaikan VMA ini menunjukkan bertambahnya ruang kosong mineral agregat yang tersedia untuk diisi oleh binder, sehingga berpotensi meningkatkan kestabilan struktur campuran. Pada campuran dengan aspal Pen 60/70, hubungan antara kadar fly ash dan VMA menunjukkan korelasi yang kuat dengan nilai R^2 sebesar 0,9069, yang menandakan bahwa perubahan kadar fly ash berpengaruh signifikan terhadap karakteristik volumetrik campuran. Sementara itu, campuran dengan binder PG76 memperlihatkan hubungan yang sangat kuat dan hampir linier sempurna dengan nilai R^2 sebesar 0,9995, yang menunjukkan respons volumetrik yang lebih stabil dan terkontrol terhadap penambahan fly ash. Tingginya konsistensi ini mengindikasikan bahwa sifat viskoelastis dan kekakuan binder PG76 mampu mempertahankan susunan agregat meskipun terjadi variasi kadar filler. Secara kuantitatif, nilai VMA awal pada campuran Pen 60/70 sedikit lebih tinggi dibandingkan PG76 pada kadar fly ash rendah, namun perbedaan tersebut semakin berkurang seiring meningkatnya kadar fly ash. Pada kadar fly ash tinggi, khususnya mendekati 100%, kedua campuran menunjukkan nilai VMA yang hampir sama, yang menandakan dominasi pengaruh fly ash terhadap struktur volumetrik campuran. Kondisi ini menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik binder menjadi kurang signifikan ketika filler mendominasi sistem campuran. Dari perspektif kinerja perkerasan, peningkatan VMA yang terjadi secara bertahap dan terkontrol merupakan kondisi yang menguntungkan karena dapat meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen. Dengan demikian, hasil ini menguatkan bahwa kombinasi fly ash dengan binder PG76 memberikan kontrol volumetrik yang lebih baik, yang selaras dengan peningkatan kinerja rutting pada lapisan AC-WC, terutama untuk aplikasi overlay pada kondisi lalu lintas berat dan suhu tinggi. Tren perubahan VMA dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Nilai VMA pada Campuran

Grafik hubungan kadar fly ash terhadap VFB / VFA (%) menunjukkan bahwa peningkatan kadar fly ash dari 0% hingga 100% menyebabkan penurunan nilai VFA yang konsisten pada campuran AC-WC dengan binder Pen 60/70 maupun PG76. Tren penurunan ini mengindikasikan bahwa penambahan fly ash meningkatkan proporsi rongga agregat mineral yang tidak terisi aspal, sejalan dengan peningkatan nilai VMA yang terjadi pada campuran yang sama. Pada campuran dengan aspal Pen 60/70, hubungan antara kadar fly ash dan VFA menunjukkan korelasi kuat dengan nilai R^2 = 0,9091, yang menandakan bahwa variasi kadar fly ash berpengaruh signifikan terhadap perubahan rongga yang terisi aspal. Sementara itu, campuran dengan binder PG76 memperlihatkan hubungan yang sangat kuat dan hampir linier sempurna (R^2 = 0,999), yang menunjukkan respons volumetrik yang sangat stabil terhadap penambahan fly ash. Nilai VFA awal pada campuran PG76 sedikit lebih tinggi dibandingkan Pen 60/70 pada kadar fly ash rendah, namun penurunannya berlangsung lebih tajam seiring peningkatan kadar fly ash. Hal ini mengindikasikan bahwa pada campuran PG76, fly ash lebih efektif dalam mengontrol distribusi aspal di dalam struktur agregat. Pada kadar fly ash tinggi, nilai VFA campuran PG76 menjadi lebih rendah dibandingkan Pen 60/70, yang mencerminkan berkurangnya proporsi aspal efektif yang mengisi rongga agregat. Penurunan VFA yang terkontrol ini menunjukkan peningkatan kekakuan struktural campuran, yang berkontribusi pada ketahanan terhadap deformasi permanen. Namun demikian, nilai VFA yang terlalu rendah berpotensi mengurangi durabilitas jika tidak diimbangi oleh kualitas ikatan aspal–agregat yang baik. Oleh karena itu, hasil ini menegaskan bahwa kombinasi fly ash dan binder PG76 mampu memberikan pengendalian volumetrik yang lebih konsisten, yang selaras dengan peningkatan kinerja rutting pada lapisan AC-WC untuk aplikasi overlay pada kondisi lalu lintas berat dan suhu tinggi. Perubahan VFA dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Nilai VFB pada Campuran

Penambahan fly ash memiliki korelasi yang kuat dan efek signifikan pada karakteristik volumetrik (VIM, VMA, dan VFB) dari campuran aspal Pen 60/70 dan PG76. Terutama pada campuran PG76, penambahan fly ash dapat meningkatkan rongga udara (VIM), tetapi akibatnya menurunkan rongga berisi aspal (VFB) dan nilai kohesi campuran. Fa telah terbukti meningkatkan stabilitas pada kedua jenis campuran. Analisis statistik (ANOVA) juga mengkonfirmasi bahwa perubahan karakteristik volumetrik pada kedua campuran signifikan, dengan nilai F lebih besar dari F-crit dan nilai P kurang dari 0,05.

Tabel 1. Nilai Korelasi *Pearson*

Jenis Campuran	Kepadatan	VIM	VMA	VFB	Stabilitas	Aliran
Pena 60/70 fly ash	-0,89	0,89	0,89	-0,89	0,85	-0,38
Hal. 76 Abu terbang	-0,97	0,97	0,97	-0,97	0,91	0,00

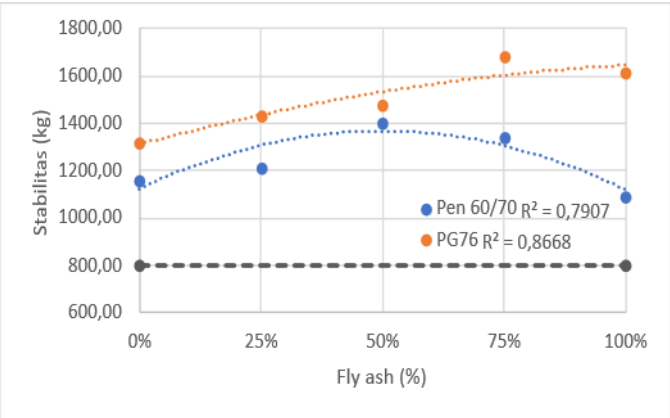
Tabel 2. Nilai F dan P pada Kedua Campuran

Karakteristik Volumetrik		PG76	Pena 60/70
VIM	*Nilai-F*	55,15	38,59
	F-Kritis	3,48	3,48
	Nilai-P	0,0000009	0,0000048
VMA	*Nilai-F*	76,27	38,69
	F-Kritis	3,48	3,48
	Nilai-P	0,00000019	0,00000469
VFB	*Nilai-F*	52,38	39,11
	F-Kritis	3,48	3,48
	Nilai-P	0,000001132	0,000004460

Grafik hubungan kadar fly ash terhadap stabilitas Marshall (kg) menunjukkan bahwa penambahan fly ash memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja mekanis campuran AC-WC dengan binder Pen 60/70 maupun PG76. Pada campuran dengan aspal Pen 60/70, nilai stabilitas meningkat dari kondisi awal hingga mencapai nilai maksimum pada kadar fly ash sekitar 50%, kemudian cenderung menurun pada kadar fly ash yang lebih tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa terdapat kadar fly ash optimum pada campuran Pen 60/70, di mana keseimbangan antara pengisian rongga dan kemampuan pelapisan aspal terhadap agregat tercapai

secara optimal. Hubungan antara kadar fly ash dan stabilitas pada campuran Pen 60/70 memiliki korelasi cukup kuat dengan nilai R^2 = 0,7907, yang menandakan bahwa fly ash berkontribusi nyata terhadap peningkatan stabilitas, meskipun responsnya tidak sepenuhnya linier.

Sebaliknya, campuran dengan binder PG76 menunjukkan peningkatan stabilitas yang konsisten seiring bertambahnya kadar fly ash hingga 100%, dengan nilai stabilitas yang secara umum lebih tinggi dibandingkan campuran Pen 60/70 pada seluruh variasi kadar fly ash. Hubungan yang sangat kuat antara kadar fly ash dan stabilitas pada campuran PG76 ditunjukkan oleh nilai R^2 = 0,8668, yang mencerminkan respons mekanis yang lebih stabil dan terkontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik binder PG76 yang lebih kaku dan tahan suhu tinggi mampu memanfaatkan peran fly ash sebagai filler aktif secara lebih efektif. Secara absolut, seluruh nilai stabilitas pada kedua campuran berada jauh di atas batas minimum stabilitas Marshall (±800 kg), yang menunjukkan bahwa semua variasi campuran memenuhi persyaratan struktural dasar. Dari perspektif kinerja perkerasan, peningkatan stabilitas yang lebih signifikan pada campuran PG76 dengan fly ash mendukung ketahanan yang lebih baik terhadap beban lalu lintas berat dan deformasi permanen. Dengan demikian, grafik ini menegaskan bahwa kombinasi fly ash dan binder PG76 memberikan peningkatan kinerja struktural yang lebih unggul, sehingga sangat relevan untuk aplikasi overlay AC-WC pada kondisi lalu lintas tinggi dan suhu layanan ekstrem. Perubahan nilai stabilitas Marshall dapat dilihat pada Gambar 4.

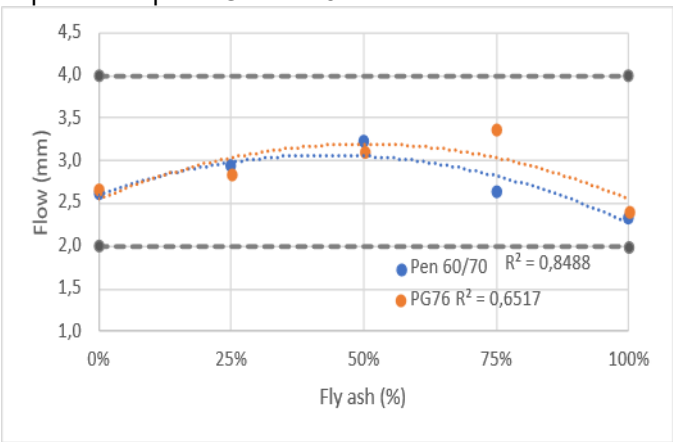


Gambar 4. Stabilitas Campuran

Grafik hubungan kadar fly ash terhadap nilai flow Marshall (mm) menunjukkan bahwa penambahan fly ash memengaruhi perilaku deformasi plastis campuran AC-WC dengan binder Pen 60/70 maupun PG76. Pada kedua jenis binder, nilai flow meningkat seiring bertambahnya kadar fly ash hingga mencapai nilai maksimum pada kadar sekitar 50–75%, kemudian cenderung menurun pada kadar fly ash yang lebih tinggi. Pola ini mengindikasikan bahwa fly ash berperan dalam meningkatkan kemampuan deformasi campuran pada kadar tertentu melalui perbaikan gradasi mikro dan distribusi binder.

Pada campuran dengan aspal Pen 60/70, hubungan antara kadar fly ash dan nilai flow menunjukkan korelasi yang kuat dengan nilai R^2 = 0,8488, yang menandakan bahwa variasi fly ash berpengaruh signifikan terhadap deformasi vertikal campuran. Nilai flow tertinggi pada campuran ini terjadi pada kadar fly ash sekitar 50%, yang menunjukkan kondisi keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas campuran. Setelah melewati kadar tersebut, penurunan nilai flow mengindikasikan meningkatnya kekakuan campuran akibat dominasi filler dalam struktur campuran.

Sementara itu, pada campuran dengan binder PG76, hubungan antara kadar fly ash dan nilai flow menunjukkan korelasi sedang dengan nilai R^2 = 0,6517, yang mencerminkan respons deformasi yang lebih stabil terhadap variasi kadar fly ash. Nilai flow campuran PG76 cenderung berada dalam rentang yang lebih terkendali dibandingkan Pen 60/70, yang menunjukkan bahwa karakteristik binder PG76 yang lebih kaku dan tahan suhu tinggi mampu membatasi deformasi plastis berlebih. Secara keseluruhan, seluruh nilai flow pada kedua campuran berada dalam rentang spesifikasi yang diizinkan (±2–4 mm), yang menunjukkan bahwa campuran masih memiliki keseimbangan yang baik antara stabilitas dan fleksibilitas. Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa kombinasi fly ash dan binder PG76 menghasilkan kontrol deformasi yang lebih baik, yang mendukung peningkatan ketahanan rutting pada lapisan AC-WC untuk aplikasi overlay di bawah beban lalu lintas berat dan suhu tinggi. Perubahan nilai flow dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Nilai Flow Campuran

Campuran pen 60/70 *fly ash* memiliki korelasi yang kuat terhadap volumetrik campuran (VIM, VMA dan VFB) dengan nilai korelasi *pearson* >0,8 dimana hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* pada campuran dengan pen 60/70 mempengaruhi volumetrik campuran. Campuran Pg76 *fly ash* memiliki nilai korelasi *pearson* kuat terhadap volumetrik campuran. *Fly ash* pada campuran Pg76 memiliki nilai korelasi 0,94 terhadap VIM, dimana hal tersebut mengindikasikan dengan penambahan kadar *fly ash* pada campuran dapat

meningkatkan rongga udara, hal tersebut mengakibatkan penurunan pada rongga terisi aspal (VFB) dengan nilai korelasi -0,93. Penurunan rongga terisi aspal pada campuran Pg76 menyebabkan adanya penurunan nilai kohesi campuran.

Nilai korelasi *fly ash* terhadap stabilitas pada kedua campuran Pen 60/70 sebesar 0,85 dan Pg76 sebesar 0,91 menunjukkan penambahan kadar *fly ash* pada kedua campuran meningkatkan stabilitas campuran. Peningkatan stabilitas campuran diakibatkan oleh *fly ash* yang memiliki kandungan silica dan alumina yang berinteraksi secara kimia terhadap bitumen sehingga memperkuat ikatan antar komponen pada campuran. Temuan ini juga didukung oleh penelitian sebelumnya (Mirković et al., 2019b) dimana penambahan *fly ash* meningkatkan stabilitas campuran akibat adanya efek pengerasan yang dimiliki oleh *fly ash*

Tabel *3.* Nilai Korelasi Perubahan Fly ash Terhaap nilai Volumetrik Marshall

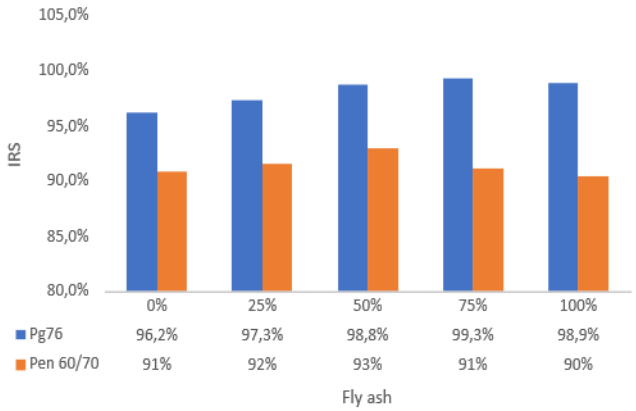
Jenis Campuran	VIM	VMA	VFB	Stabilitas	Flow
Pen 60/70	0,89	0,89	-0,89	0,85	-0,38
Pg76	0,97	0,97	-0,97	0,91	0,00

Pengaruh Fly Ash (Fa) Terhadap Nilai Index Retained Strength (IRS)

Grafik menunjukkan pengaruh penambahan fly ash terhadap Index of Retained Strength (IRS) pada campuran AC-WC dengan binder PG76 dan Pen 60/70, yang merepresentasikan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat kelembaban. Secara umum, seluruh nilai IRS berada di atas batas minimum 90%, yang menandakan bahwa semua variasi campuran memenuhi persyaratan ketahanan terhadap pengaruh air. Pada campuran dengan binder PG76, nilai IRS relatif tinggi dan stabil pada seluruh variasi kadar fly ash, meningkat dari 96,2% pada 0% fly ash menjadi maksimum 99,3% pada 75% fly ash, kemudian sedikit menurun menjadi 98,9% pada 100% fly ash. Pola ini menunjukkan bahwa kombinasi PG76 dan fly ash mampu mempertahankan ikatan aspal–agregat secara efektif meskipun campuran terpapar kondisi perendaman.

Sebaliknya, campuran dengan aspal Pen 60/70 menunjukkan nilai IRS yang lebih rendah dibandingkan PG76 pada seluruh kadar fly ash, dengan rentang nilai 90–93%. Nilai IRS campuran Pen 60/70 meningkat dari 91% pada 0% fly ash hingga mencapai 93% pada 50% fly ash, kemudian menurun kembali pada kadar fly ash yang lebih tinggi. Tren ini mengindikasikan bahwa fly ash memberikan kontribusi positif terhadap ketahanan kelembaban pada kadar tertentu, namun efektivitasnya cenderung menurun ketika kandungan fly ash terlalu tinggi pada campuran dengan binder konvensional. Perbedaan respons ini menegaskan bahwa binder PG76 lebih kompatibel dengan fly ash dalam memperkuat ikatan mikrostruktur campuran melalui mekanisme kimia dan fisik.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa integrasi fly ash dengan binder berkinerja tinggi seperti PG76 menghasilkan nilai IRS yang lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan dengan campuran Pen 60/70, sehingga lebih efektif dalam mengurangi kerusakan akibat kelembaban. Temuan ini memperkuat peran fly ash sebagai filler aktif yang tidak hanya memengaruhi karakteristik volumetrik dan mekanis, tetapi juga meningkatkan durabilitas campuran AC-WC. Dengan demikian, kombinasi PG76 dan fly ash sangat potensial diterapkan pada pekerjaan overlay, terutama pada perkerasan dengan tingkat paparan air tinggi dan kondisi lalu lintas berat.

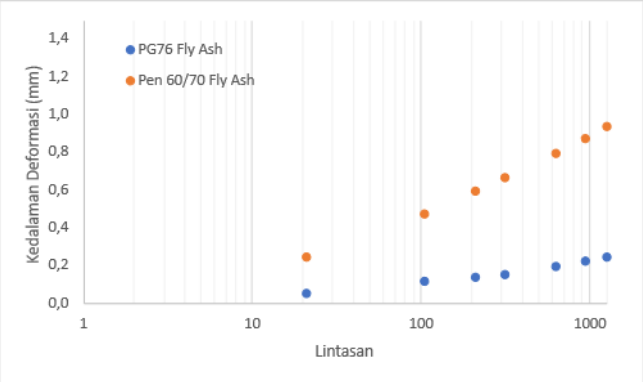


Gambar 6. Nilai IRS Campuran

Pengaruh Temperatur Terhadap Karakteristik *Rutting*

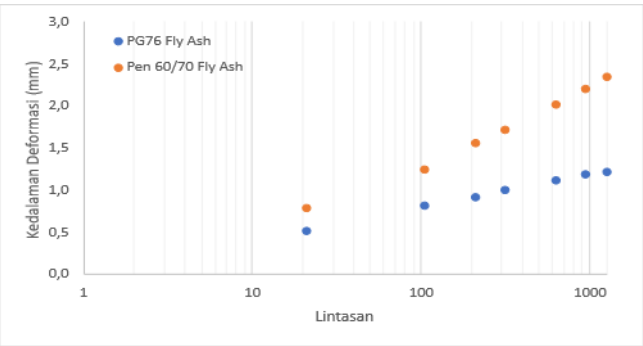
Grafik hubungan jumlah lintasan roda terhadap kedalaman deformasi (mm) pada suhu pengujian 25 °C (gambar 7) menunjukkan perbedaan kinerja rutting yang sangat jelas antara campuran AC-WC dengan binder PG76 + fly ash dan Pen 60/70 + fly ash. Pada suhu ini, kedalaman deformasi pada kedua campuran meningkat seiring bertambahnya jumlah lintasan, yang mencerminkan akumulasi deformasi permanen akibat beban berulang meskipun berada pada kondisi temperatur relatif rendah. Namun, laju peningkatan deformasi pada campuran Pen 60/70 + fly ash jauh lebih tinggi dibandingkan campuran PG76 + fly ash, yang menunjukkan ketahanan rutting yang lebih rendah pada binder konvensional. Pada jumlah lintasan rendah, perbedaan deformasi antar kedua campuran masih relatif kecil, tetapi selisih tersebut semakin meningkat pada lintasan yang lebih tinggi. Campuran Pen 60/70 + fly ash mengalami peningkatan deformasi hingga mendekati sekitar 1,0 mm pada lintasan tertinggi, sedangkan campuran PG76 + fly ash hanya menunjukkan deformasi sekitar 0,25–0,30 mm pada kondisi yang sama. Rendahnya deformasi pada campuran PG76 + fly ash pada suhu 25 °C menunjukkan bahwa binder berkinerja tinggi tetap mampu mempertahankan stabilitas struktural meskipun pada kondisi beban berulang. Selain itu, peran fly ash sebagai filler aktif turut memperkuat struktur mikro campuran sehingga

menghambat terjadinya aliran plastis. Sebaliknya, pada campuran Pen 60/70, sifat viskoelastis binder yang lebih lunak menyebabkan deformasi terakumulasi lebih cepat meskipun pada suhu menengah. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pada suhu 25 °C, kombinasi PG76 dan fly ash memberikan ketahanan rutting yang lebih unggul dibandingkan campuran Pen 60/70, sehingga menunjukkan potensi yang baik untuk aplikasi overlay AC-WC pada kondisi lalu lintas berat.



Gambar 7. Deformasi Pada Suhu 25ºC

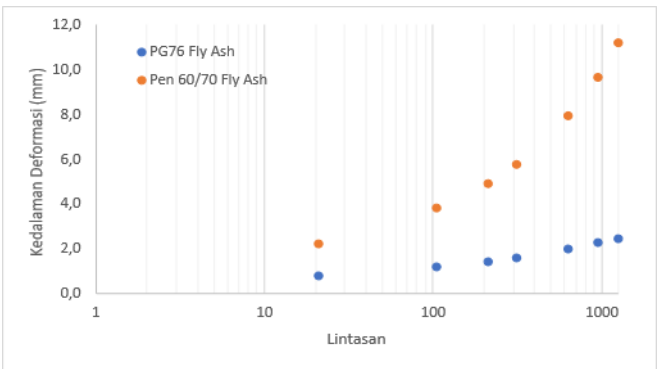
Grafik hubungan jumlah lintasan roda terhadap kedalaman deformasi (mm) pada suhu pengujian 45 °C (gambar 8) menunjukkan peningkatan deformasi permanen yang signifikan pada kedua campuran AC-WC, yang menandakan meningkatnya sensitivitas campuran terhadap rutting pada suhu layanan tinggi. Pada suhu 45 °C, kedalaman deformasi bertambah secara progresif seiring meningkatnya jumlah lintasan, mencerminkan akumulasi alur akibat pelemahan sifat viskoelastis binder. Campuran Pen 60/70 + fly ash menunjukkan laju deformasi yang lebih tinggi dibandingkan campuran PG76 + fly ash pada seluruh rentang lintasan. Perbedaan deformasi sudah terlihat sejak lintasan awal dan semakin membesar pada lintasan yang lebih tinggi. Pada lintasan tertinggi, campuran Pen 60/70 + fly ash mencapai kedalaman deformasi sekitar 2,3–2,5 mm, sedangkan campuran PG76 + fly ash hanya sekitar 1,2–1,3 mm.



Gambar 8. Deformasi Pada Suhu 45ºC

Hasil ini menunjukkan bahwa pada suhu 45 °C, binder konvensional Pen 60/70 mengalami penurunan kekakuan yang lebih signifikan, sehingga deformasi plastis terakumulasi lebih cepat meskipun telah ditambahkan fly ash sebagai filler aktif. Sebaliknya, binder PG76 masih mampu mempertahankan stabilitas struktural campuran, yang ditunjukkan oleh laju deformasi yang lebih rendah dan pertambahan deformasi yang lebih terkendali. Peran fly ash pada kedua campuran tetap berkontribusi dalam memperkuat struktur mikro, namun efektivitasnya sangat bergantung pada kemampuan binder dalam menahan aliran plastis pada suhu tinggi. Secara mekanistik, hasil ini menegaskan bahwa kenaikan suhu dari kondisi sedang ke tinggi memperbesar potensi rutting, terutama pada campuran dengan binder konvensional. Dengan demikian, pengujian pada 45 °C memperkuat temuan bahwa kombinasi PG76 dan fly ash memberikan ketahanan rutting yang lebih unggul dan lebih sesuai untuk aplikasi overlay AC-WC pada kondisi lalu lintas berat dan suhu layanan tinggi.

Grafik hubungan jumlah lintasan roda terhadap kedalaman deformasi (mm) pada suhu pengujian 60 °C (gambar 9) menunjukkan peningkatan deformasi permanen yang sangat tajam pada kedua campuran AC-WC, yang menandakan kondisi kritis bagi ketahanan rutting campuran aspal. Pada suhu ini, kedalaman deformasi meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah lintasan, mencerminkan pelemahan signifikan sifat viskoelastis binder akibat temperatur layanan yang sangat tinggi. Campuran Pen 60/70 + fly ash menunjukkan laju deformasi yang jauh lebih besar dibandingkan campuran PG76 + fly ash pada seluruh rentang lintasan. Bahkan pada lintasan awal, deformasi pada campuran Pen 60/70 sudah relatif tinggi dan meningkat sangat cepat pada lintasan berikutnya. Pada lintasan tertinggi, campuran Pen 60/70 + fly ash mencapai kedalaman deformasi sekitar 10–12 mm, sedangkan campuran PG76 + fly ash hanya menunjukkan deformasi sekitar 2,5–3,0 mm.



Gambar 9. Deformasi Pada Suhu 60ºC

Perbedaan yang sangat mencolok ini menunjukkan bahwa pada suhu 60 °C, binder konvensional Pen 60/70 mengalami kegagalan struktural yang signifikan, di mana kemampuan menahan aliran plastis hampir sepenuhnya hilang meskipun telah ditambahkan fly ash sebagai filler. Sebaliknya, binder PG76 masih mampu mempertahankan sebagian besar stabilitas struktural campuran, yang tercermin dari deformasi yang jauh lebih rendah dan pertambahan deformasi yang lebih terkendali. Peran fly ash pada kedua campuran tetap memberikan kontribusi terhadap penguatan struktur mikro, namun efektivitasnya menjadi sangat bergantung pada kemampuan binder dalam menahan deformasi pada suhu ekstrem. Secara

mekanistik, hasil ini menegaskan bahwa kenaikan suhu hingga 60 °C secara drastis meningkatkan potensi rutting, terutama pada campuran dengan binder konvensional. Dengan demikian, pengujian pada 60 °C secara kuat menegaskan bahwa kombinasi PG76 dan fly ash memberikan ketahanan rutting yang jauh lebih unggul, sehingga sangat relevan untuk aplikasi overlay AC-WC pada kondisi lalu lintas berat dan iklim tropis dengan suhu permukaan tinggi.

Tabel 3. Nilai Konstanta Deformasi Campuran PG76

PG76 Fly Ash	a	b	r^2
25ºC	0,0050	0,6046	0,9249
45ºC	0,0187	0,6900	0,7017
60ºC	0,0272	0,7190	0,8651

Tabel 4. Nilai Konstanta Deformasi Campuran Pen 60/70

Pen 60/70 Fly Ash	a	b	r^2
25ºC	0,0136	0,673	0,8521
45ºC	0,0274	0,719	0,8055
60ºC	0,0675	0,7871	0,9503

Perbandingan nilai konstanta deformasi pada campuran PG76 dan Pen 60/70 dengan fly ash pada table 4 dan table 5, menunjukkan pengaruh suhu yang sangat signifikan terhadap mekanisme rutting, baik dari sisi besaran deformasi (konstanta a) maupun laju pertumbuhan deformasi (eksponen b). Pada seluruh tingkat suhu, nilai konstanta a campuran Pen 60/70 selalu lebih tinggi dibandingkan PG76, yang mengindikasikan bahwa deformasi awal dan sensitivitas terhadap beban berulang pada binder konvensional lebih besar. Pada suhu 25 °C, nilai a campuran Pen 60/70 (0,0136) hampir tiga kali lebih besar dibandingkan PG76 (0,0050), menunjukkan bahwa sejak kondisi suhu rendah pun campuran Pen 60/70 lebih rentan terhadap deformasi permanen.

Seiring peningkatan suhu ke 45 °C dan 60 °C, kenaikan nilai a terjadi jauh lebih tajam pada campuran Pen 60/70, dari 0,0274 hingga 0,0675, sedangkan pada PG76 hanya meningkat dari 0,0187 menjadi 0,0272. Hal ini menegaskan bahwa sensitivitas suhu terhadap rutting pada Pen 60/70 jauh lebih tinggi, yang mencerminkan penurunan kekakuan binder secara signifikan pada temperatur tinggi. Dari sisi eksponen b, kedua campuran menunjukkan peningkatan nilai b seiring kenaikan suhu, yang menandakan percepatan laju akumulasi deformasi akibat pelemahan viskoelastis binder. Namun demikian, nilai b pada campuran Pen 60/70 selalu lebih besar dibandingkan PG76, khususnya pada suhu 60 °C (0,7871 vs 0,7190), yang mengindikasikan laju rutting yang lebih agresif.

Nilai koefisien determinasi (R^2) pada kedua campuran relatif tinggi (>0,70), menunjukkan bahwa model deformasi mampu merepresentasikan perilaku rutting dengan baik. Menariknya, nilai R^2 tertinggi pada campuran Pen 60/70 terjadi pada suhu 60 °C (0,9503), yang mengindikasikan bahwa pada kondisi suhu ekstrem, deformasi menjadi sangat dominan dan terkontrol oleh mekanisme plastis. Sebaliknya, pada PG76, nilai R^2 tertinggi terjadi pada suhu 25 °C (0,9249), menunjukkan stabilitas respons deformasi yang lebih baik pada rentang suhu rendah hingga menengah.

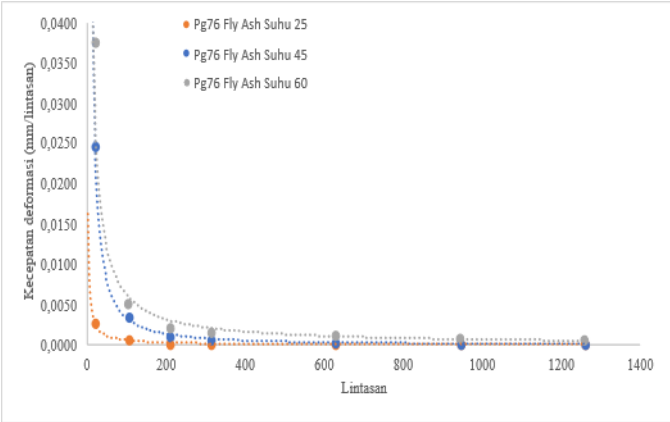
Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa campuran PG76 dengan fly ash memiliki konstanta deformasi yang lebih kecil dan laju pertumbuhan rutting yang lebih terkendali dibandingkan Pen 60/70, terutama pada suhu tinggi. Temuan ini konsisten dengan hasil uji rutting sebelumnya dan memperkuat kesimpulan bahwa kombinasi binder berkinerja tinggi (PG76) dan fly ash lebih efektif dalam menahan deformasi permanen, sehingga lebih layak diterapkan pada lapisan AC-WC untuk aplikasi overlay di bawah lalu lintas berat dan kondisi iklim panas.

Hubungan Lintasan dan Kecepatan Deformasi (RD)

Grafik menunjukkan hubungan antara jumlah lintasan roda dan kecepatan deformasi (mm/lintasan) pada campuran AC-WC dengan binder PG76 + fly ash untuk tiga tingkat suhu pengujian, yaitu 25 °C, 45 °C, dan 60 °C. Secara umum, pada ketiga suhu terlihat bahwa kecepatan deformasi tertinggi terjadi pada lintasan awal, kemudian menurun tajam seiring bertambahnya jumlah lintasan, hingga akhirnya mendekati nilai yang sangat kecil dan relatif stabil. Pola ini mengindikasikan bahwa campuran PG76 mengalami fase penyesuaian awal (initial densification), di mana deformasi terjadi relatif cepat, sebelum mencapai kondisi stabil akibat terbentuknya struktur internal yang lebih rapat.

Pengaruh suhu terlihat sangat jelas, di mana kenaikan suhu menyebabkan peningkatan kecepatan deformasi, terutama pada lintasan awal. Pada suhu 60 °C, kecepatan deformasi awal merupakan yang paling tinggi, diikuti oleh suhu 45 °C, sedangkan suhu 25 °C menunjukkan nilai terendah. Hal ini mencerminkan berkurangnya kekakuan binder PG76 pada temperatur tinggi yang meningkatkan respons viskoelastis campuran terhadap beban berulang. Namun demikian, meskipun pada suhu 60 °C kecepatan deformasi awal lebih besar, penurunannya berlangsung cepat dan selanjutnya cenderung stabil pada lintasan menengah hingga tinggi.

Kondisi ini menunjukkan bahwa binder PG76 masih mampu mengendalikan laju deformasi pada suhu tinggi, terutama setelah fase awal pembebanan terlampaui. Peran fly ash sebagai filler aktif turut membantu memperkuat struktur mikro campuran, sehingga menekan kecepatan deformasi pada lintasan berikutnya. Secara keseluruhan, grafik ini menegaskan bahwa meskipun suhu tinggi meningkatkan laju deformasi awal, campuran PG76 + fly ash memiliki kemampuan adaptif yang baik untuk menstabilkan deformasi permanen, yang mendukung ketahanan rutting pada lapisan AC-WC, khususnya untuk aplikasi overlay pada kondisi lalu lintas berat dan iklim panas.

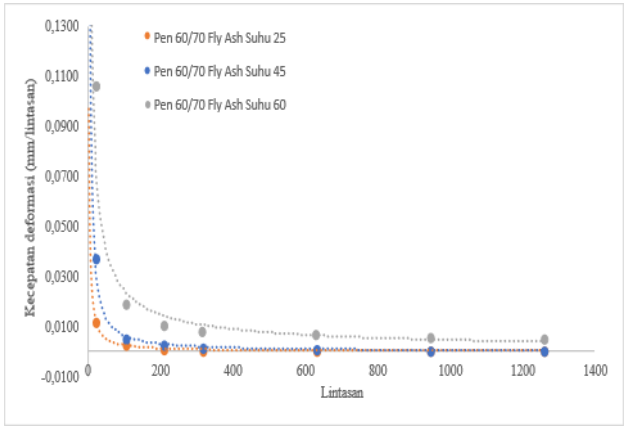


Gambar 10. Kecepatan Deformasi Pg76

Grafik Gambar 11 menunjukkan hubungan antara jumlah lintasan roda dan kecepatan deformasi (mm/lintasan) pada campuran AC-WC dengan binder Pen 60/70 + fly ash pada suhu 25 °C, 45 °C, dan 60 °C. Pada ketiga suhu, kecepatan deformasi tertinggi terjadi pada lintasan awal dan kemudian menurun seiring bertambahnya lintasan, yang mencerminkan fase densifikasi awal akibat penataan ulang agregat dan aliran plastis binder. Namun, dibandingkan campuran PG76, nilai kecepatan deformasi pada Pen 60/70 secara konsisten lebih tinggi, terutama pada suhu menengah hingga tinggi.

Pengaruh suhu sangat dominan pada campuran Pen 60/70, di mana kenaikan suhu dari 25 °C ke 60 °C menyebabkan peningkatan tajam kecepatan deformasi awal. Pada suhu 60 °C, kecepatan deformasi awal merupakan yang paling tinggi dan penurunannya berlangsung lebih lambat dibandingkan suhu 25 °C dan 45 °C. Hal ini menunjukkan bahwa binder Pen 60/70 mengalami penurunan kekakuan yang signifikan pada suhu tinggi, sehingga deformasi plastis masih terus berkembang meskipun lintasan bertambah. Pada suhu 45 °C, kecepatan deformasi berada di antara kedua kondisi tersebut, namun tetap lebih tinggi dibandingkan suhu 25 °C pada seluruh rentang lintasan.

Meskipun penambahan fly ash berkontribusi dalam menurunkan kecepatan deformasi seiring bertambahnya lintasan, efektivitas fly ash pada campuran Pen 60/70 sangat dibatasi oleh sifat viskoelastis binder yang lebih lunak. Berbeda dengan PG76 yang cepat mencapai kondisi stabil, campuran Pen 60/70 menunjukkan fase stabilisasi yang lebih lambat, terutama pada suhu tinggi. Secara mekanistik, kondisi ini menegaskan bahwa binder konvensional Pen 60/70 lebih sensitif terhadap suhu dan beban berulang, sehingga memiliki potensi rutting yang lebih besar. Dengan demikian, grafik ini memperkuat temuan bahwa pada kondisi suhu tinggi, kombinasi Pen 60/70 + fly ash masih rentan terhadap deformasi permanen, dan kinerjanya lebih rendah dibandingkan campuran dengan binder PG76, khususnya untuk aplikasi overlay AC-WC pada lalu lintas berat dan iklim panas.



Gambar 11. Kecepatan Deformasi Pen 60/70

KESIMPULAN

Penggunaan fly ash pada campuran aspal dengan binder PG76 dan Pen 60/70 terbukti memengaruhi sifat volumetrik dan stabilitas campuran. Penambahan fly ash meningkatkan nilai VIM dan VMA serta menurunkan VFB, yang menunjukkan perubahan struktur rongga campuran, namun seluruh nilai masih berada dalam batas spesifikasi. Stabilitas Marshall meningkat signifikan, terutama pada campuran PG76 fly ash dengan kadar optimal 100% yang menghasilkan stabilitas 1.614,86 kg (meningkat 19,46%), sedangkan pada Pen 60/70 kadar optimal terjadi pada 75% fly ash dengan stabilitas 1.347,08 kg (meningkat 15,65%).

Nilai Index of Retained Strength (IRS) pada seluruh variasi campuran berada di atas batas minimum 90%, yang menunjukkan ketahanan yang baik terhadap kerusakan akibat kelembaban. Campuran PG76 fly ash menunjukkan peningkatan IRS yang lebih konsisten hingga mendekati 99%, menandakan kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan ikatan aspal–agregat setelah perendaman dibandingkan Pen 60/70.

Hasil uji Wheel Tracking Machine (WTM) menunjukkan bahwa temperatur pengujian (25 °C, 45 °C, dan 60 °C) berpengaruh signifikan terhadap total deformasi, laju deformasi, dan stabilitas dinamis. Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan total deformasi dan laju deformasi serta penurunan stabilitas dinamis pada kedua campuran, dengan efek yang jauh lebih dominan pada campuran Pen 60/70.

Campuran PG76 fly ash menunjukkan total deformasi dan laju deformasi yang lebih rendah serta stabilitas dinamis yang lebih tinggi dibandingkan campuran Pen 60/70 fly ash pada seluruh suhu pengujian. Perbedaan ini semakin signifikan pada suhu tinggi (60 °C), di mana campuran Pen 60/70 mengalami peningkatan deformasi yang sangat cepat dan berpotensi mengalami kegagalan rutting lebih dini.

Analisis konstanta deformasi menunjukkan bahwa nilai konstanta awal deformasi (*a*) dan eksponen laju deformasi (*b*) pada campuran Pen 60/70 meningkat jauh lebih tajam seiring kenaikan suhu dibandingkan PG76. Hal ini mengindikasikan bahwa PG76 memiliki

sensitivitas suhu yang lebih rendah dan kemampuan lebih baik dalam mengendalikan deformasi plastis, terutama ketika dikombinasikan dengan fly ash sebagai filler aktif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa sifat polimer pada PG76 dan sinerginya dengan fly ash menghasilkan kinerja rutting yang lebih unggul, sehingga kombinasi ini lebih direkomendasikan untuk aplikasi overlay AC-WC pada kondisi lalu lintas berat dan iklim tropis dengan suhu permukaan tinggi.

REFERENSI

Alkaissi, Z. A., & Al-Kaissi, K. A. (2024). State-of-the-Art Review of Research on the Rutting of Flexible Pavement. *AIP Conference Proceedings*, *3091*(1). https://doi.org/10.1063/5.0204514

International Journal of GEOMATE,Dec., 2025. (n.d.).

Jaleel, M. M., Albdairi, M., & Almusawi, A. (2025). Marshall-Based Thermal Performance Analysis of Conventional and Polymer-Modified Asphalt Binders. *Construction Materials*, *5*(2). https://doi.org/10.3390/constrmater5020040

Junaid, M., Irfan, M., Ahmed, S., & Ali, Y. (2018). Effect of binder grade on performance parameters of asphaltic concrete paving mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *11*(5), 435–444. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.11.006

Maghfirah, A. D., Adisasmita, S. A., & Tumpu, M. (2024). Volumetric Assessment of Hot Mix Asphalt Incorporating Petroleum Bitumen and High-Calcium Fly Ash for Binder Courses: A Case Study. *Annales de Chimie: Science Des Materiaux*, *48*(6), 813–822. https://doi.org/10.18280/acsm.480607

Mathew, T. V, & Rao, K. (2006). *Marshall Mix Design*.

Mirković, K., Tošić, N., & Mladenović, G. (2019a). Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/8107264

Mirković, K., Tošić, N., & Mladenović, G. (2019b). Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/8107264

Mukhambetkaliyev, K. K., Chugulyov, B. D., Kabdrashit, J. K., Shakhmov, Z. A., & Utepov, Y. B. (2025). Hydrophobic Fly Ash-Based Mineral Powder for Sustainable Asphalt Mixtures. *Journal of Composites Science*, *9*(12). https://doi.org/10.3390/jcs9120701

Nazal, H. H., & Ismael, M. Q. (2019). Evaluation the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Containing Demolished Concrete Waste Materials. *Civil Engineering Journal (Iran)*, *5*(4), 845–855. https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091293

Rocha, M. L., Enríquez-León, A. J., Aragão, F. T. S., Espíndola, R. P., & Nascimento, L. A. H. do. (2024). Exploring the effects of volumetrics and binder properties on the performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *438*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137054

Rostampour Sheykhneshin, A., & Hamedi, G. H. (2025). Evaluating the moisture damage mechanism in hot-mix asphalt using the fundamental material parameters. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, *6*(1). https://doi.org/10.1186/s43065-025-00143-1

Selmi Kaffa, N., Pranadiarso, T., Farid Ardiansyah, A., Amrodh Alawy, G., & Rohmahillah Aviskanasya Septiandri, dan. (2025). *PERBANDINGAN KINERJA CAMPURAN BERASPAL DARI ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL PG DI INDONESIA* (Vol. 8, Issue 4).

Tambunan, H. F., Hadiwardoyo, S. P., Sumabrata, R. J., & Lumingkewas, R. H. (2025). Volumetric and Rutting Analysis on Degradation of Aggregate and Asphalt Reclaimed Asphalt Pavement. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, *15*(2), 21566–21574. https://doi.org/10.48084/etasr.9643

Zhao, X., Ge, D., Wang, J., Wu, D., & Liu, J. (2022). The Performance Evaluation of Asphalt Mortar and Asphalt Mixture Containing Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash. *Materials*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/ma15041387

Zou, G., Xu, J., & Wu, C. (2017). Evaluation of factors that affect rutting resistance of asphalt mixes by orthogonal experiment design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *10*(3), 282–288. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.008