

## Evaluasi Ketahanan dan Stabilitas *Rutting* Campuran AC-WC PG76 Menggunakan *Filler* Zeolit Alam pada Variasi Temperatur Pengujian

Bernaditha Catur Marina<sup>1)</sup>, Hermon Frederik Tambunan<sup>2)</sup>,  
Yohana Westi Lumban Tobing<sup>3)</sup>, Boy Hasiholan Sipayung<sup>4)</sup>

<sup>1, 2, 3, 4)</sup> Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera,

Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365

Email: [bernaditha@si.itera.ac.id](mailto:bernaditha@si.itera.ac.id)<sup>1)</sup>, [hermon.tambunan@si.itera.ac.id](mailto:hermon.tambunan@si.itera.ac.id)<sup>2)</sup>

[boy.121210040@student.itera.ac.id](mailto:boy.121210040@student.itera.ac.id)<sup>3)</sup> [yohana.121210058@student.itera.ac.id](mailto:yohana.121210058@student.itera.ac.id)<sup>4)</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v16i1.1328>

(Received: 25 October 2025 / Revised: 17 November 2025 / Accepted: 31 January 2026)

### Abstrak

Kerusakan alur (*rutting*) pada perkerasan aspal di wilayah tropis dipercepat oleh temperatur tinggi dan beban lalu lintas berulang. Studi ini mengevaluasi ketahanan *rutting* campuran AC-WC dengan *filler* zeolit alam pada dua jenis pengikat, aspal konvensional Pen 60/70 dan aspal termodifikasi polimer PG76. Uji Marshall digunakan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) dan kadar zeolit optimum pada substitusi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%, termasuk parameter volumetrik dan Indeks Kekuatan Sisa (IKS). Kinerja *rutting* diuji menggunakan *wheel tracking machine* pada 25°C, 45°C, dan 60°C. KAO diperoleh 6,575% untuk Pen 60/70 dan 6,475% untuk PG76, dengan kadar zeolit optimum berturut-turut 25% dan 50%. Pada temperatur tinggi, campuran PG76 menunjukkan deformasi lebih rendah dan stabilitas dinamis lebih tinggi dibanding Pen 60/70. Ketahanan *rutting* terbaik dicapai oleh PG76 dengan 50% zeolit sebesar 1431,82 lintasan/mm, lebih tinggi daripada Pen 60/70 dengan 25% zeolit sebesar 828,95 lintasan/mm.

Kata Kunci: *Rutting (Alur), Volumetrik, Zeolit Alam, PG76, Wheel Tracking Machine*

### Abstract

*Rutting* in tropical asphalt pavements is accelerated by high temperatures and repeated traffic loading. Therefore, improving filler selection and binder modification is critical for durability. This study evaluates the *rutting* resistance of AC-WC mixtures using natural zeolite filler with two binders: conventional Pen 60/70 and polymer-modified PG76. Marshall testing determined the Optimum Asphalt Content (OAC) and optimum zeolite dosage at 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%, along with volumetric properties and the Retained Strength Index (RSI). *Rutting* performance was assessed using a wheel-tracking machine at 25 °C, 45 °C, and 60 °C to assess temperature susceptibility. The OACs were 6,575% (Pen 60/70) and 6,475% (PG76), with optimum zeolite contents of 25% and 50%, respectively. At elevated temperatures, PG76 mixtures showed lower permanent deformation and higher dynamic stability than Pen 60/70. The best performance was PG76 with 50% zeolite: 1431,82 passes/mm, compared with 828,95 passes/mm for Pen 60/70 with 25% zeolite.

Keywords: *Rutting, Volumetrik, Zeolite, PG76, Wheel Tracking Machin*

## 1. Latar Belakang

Kerusakan perkerasan di Indonesia, terutama pada daerah tropis seperti Provinsi Lampung, seringkali disebabkan oleh kombinasi faktor beban lalu lintas yang berlebih (*overload*) dan kondisi iklim yang panas. Kerusakan pada perkerasan jalan sebagian besar berupa retak dan cacat permukaan (Manurung *et al.*, 2022). Dampak dari kendaraan kelebihan muatan terhadap umur lelah struktur perkerasan sangatlah besar. Hasil analisis menunjukkan bahwa adanya 20% kendaraan bermuatan lebih di jalan dapat menyebabkan penurunan ketahanan lelah perkerasan aspal sekitar 50% (Rys *et al.*, 2016). Untuk mengatasi tantangan tersebut, inovasi dalam penggunaan material lokal yang mampu meningkatkan performa campuran aspal menjadi sangat krusial. Salah satu material lokal yang dapat dimanfaatkan menjadi *filler* yaitu zeolit alam. Penggunaan zeolit alam yang memiliki sifat fisik seperti luas permukaan yang besar, kemampuan absorpsi, dan sifat *filler* yang mampu mengisi rongga antar agregat. Penggunaan zeolit alam sebagai *filler* lebih disarankan daripada dalam bentuk pasir, karena peningkatannya tidak signifikan namun menawarkan keuntungan tambahan berupa penghematan aditif (Alonso *et al.*, 2013). Zeolit yang memiliki kemampuan pengaku yang mirip dengan batu kapur, berpotensi digunakan sebagai *filler* mandiri pada campuran aspal, walau akan meningkatkan kekerasan bitumen tanpa merusak karakteristik bahan pengikat (Woszuk *et al.*, 2020). Secara spesifik campuran aspal dengan zeolit alam merupakan kombinasi yang baik untuk memberikan ketahanan terhadap deformasi permanen. Meskipun tidak dapat memberikan perubahan secara signifikan namun dapat menurunkan suhu penghamparan hingga 30°C yang menguntungkan terhadap sisi ekonomi dan lingkungan (Bichajlo *et al.*, 2025).

Selain inovasi penggunaan *filler*, campuran aspal panas dengan menggunakan aspal PG76 yang memiliki kandungan seperti SBS viskositas yang lebih tinggi dan modulus geser yang lebih kompleks. Hal tersebut mengakibatkan campuran memiliki kemampuan lebih besar untuk menahan deformasi pada suhu tinggi untuk ketahanan terhadap alur / *rutting* (Riyad *et al.*, 2024). Peningkatan nilai viskositas kinetik pada bahan pengikat akan menghasilkan peningkatan pada daya tahan (durabilitas) dan kemampuan campuran untuk menahan alur / *rutting* (Ma *et al.*, 2018). Peningkatan suhu secara drastis merusak perkerasan aspal dan menjadi penyebab utama kerusakan alur (*rutting*) yang parah. Saat suhu mencapai tingkat ekstrem material aspal berubah sifat menjadi seperti cairan kental (visko-fluida). Kondisi ini menyebabkan daya rekat antar material (agregat) melemah secara signifikan, sehingga struktur jalan kehilangan kekuatannya dan menjadi sangat rentan terhadap deformasi permanen yang tidak dapat diperbaiki (Li *et al.*, 2025). Campuran yang dimodifikasi polimer secara konsisten menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada campuran 40/50 tanpa modifikasi dalam semua kondisi pengujian. Lebih detailnya, pada suhu 75 °C, campuran PG 76-10 memiliki stabilitas sekitar 9% lebih tinggi, kekakuan 28% lebih tinggi, dan deformasi kelelahan (*flow*) 18% lebih rendah jika dibandingkan dengan campuran konvensional 40/50 (Jaleel *et al.*, 2025).

*Marshall immersion* merupakan parameter penting dalam menilai ketahanan campuran aspal terhadap kerusakan akibat air dan kelembaban, setelah spesimen direndam (*immersed*) dalam air untuk suatu durasi tertentu. Penambahan 1,5% zeolit alam bayat pada aspal polimer campuran hangat terbukti menghasilkan kinerja optimal. Berdasarkan uji Marshal, campuran ini mencapai nilai stabilitas

tertinggi sebesar 1627,7 kg dan memiliki stabilitas sisa 93,36%, yang menegaskan bahwa kombinasi material agregat, aspal, dan zeolit sangat layak digunakan (Handayani *et al.*, 2019). Penelitian lain juga menunjukkan aspal yang dimodifikasi dengan SBS memberikan Indeks Kekuatan Sisa (IKS) terbaik (mencapai 93,33% dan 91,48%). Hal ini membuktikan bahwa modifikasi *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS) membuat aspal lebih tahan terhadap kerusakan akibat pengaruh cuaca dan air dibandingkan aspal standar atau modifikasi yang lain (Pataras *et al.*, 2021). Kondisi inilah yang menyoroti celah krusial dalam literatur yang ada. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi performa *rutting* campuran aspal dengan berbagai jenis *binder* dan *filler*, sebagian besar studi masih terbatas pada satu atau dua temperatur pengujian yang tidak mencerminkan variasi suhu aktual di lapangan, khususnya di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia. Padahal, suhu permukaan jalan dapat berfluktuasi secara signifikan, mencapai sampai 60°C pada siang hari di musim kemarau. Studi-studi yang ada umumnya hanya mengevaluasi satu kondisi suhu tetap, sehingga belum menggambarkan seberapa sensitif campuran terhadap perubahan suhu lingkungan yang ekstrem. Padahal penelitian yang menguji campuran pada rentang suhu hingga 60°C, menunjukkan bahwa peringkat ketahanan *rutting* campuran dapat berubah seiring kenaikan suhu (Stimilli *et al.*, 2015).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja *rutting* campuran aspal panas dengan penggunaan zeolit sebagai *filler*, terhadap ketahanan deformasi (*deformation resistance*) dan stabilitas dinamis (*dynamic stability*). Campuran yang digunakan yaitu dengan aspal PG76 dan aspal Pen 60/70 dengan mengevaluasi karakteristik volumetrik dengan variasi *filler* zeolit 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dan kinerja *rutting* melalui pengujian deformasi dengan variasi suhu pengujian 25°, 45° dan 60°C.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Material

#### 2.1.1 Aspal

Aspal adalah bahan pengikat berbasis hidrokarbon (bitumen) dari residu penyulingan minyak bumi yang berfungsi merekatkan agregat serta mengisi rongga campuran beraspal. Aspal bersifat termoplastis yang melunak saat dipanaskan dan kembali ketika suhu turun, sehingga sesuai untuk proses pencampuran dan pemadatan. Berdasarkan sumbernya, aspal dibedakan menjadi aspal alam dan aspal buatan. Aspal alam diperoleh langsung dari alam (misalannya *Asbuton/rock asphalt* dan *lake asphalt*), sedangkan aspal buatan dihasilkan melalui proses destilasi, mencakup aspal keras untuk hotmix, aspal cair untuk prime coat/tack coat, serta aspal emulsi (kationik, anionik, dan nonionik)

Untuk meningkatkan kinerja pada suhu tinggi dan lalu lintas berat, digunakan aspal modifikasi (*polymer modified bitumen*), seperti PG76 seperti pada penelitian ini. Jenis aspal ini umumnya lebih tahan deformasi permanen dibanding aspal konvensional Pen 60/70, dengan penambahan *Styrene Butadiene Styrene* (SBS) sebagai zat aditif. Karakteristik aspal dievaluasi melalui pengujian fisik utama, seperti penetrasi, viskositas, titik lembek, daktilitas, titik nyala/titik bakar, berat jenis, dan kehilangan berat akibat pemanasan, sebagai dasar penilaian mutu sebelum digunakan dalam campuran.

### 2.1.2 Filler

Zeolit alam digunakan sebagai filler (material halus lolos saringan No. 200/0,075 mm) dalam campuran aspal untuk mengisi rongga, meningkatkan kepadatan, serta memperkuat kohesi-adhesi antara aspal dan agregat sehingga kinerja mekanik dan durabilitas campuran membaik. Zeolit merupakan mineral aluminosilikat berpori yang terbentuk dari endapan abu vulkanik; pori-porinya membantu proses penyerapan dan efek sementasi, sehingga zeolit efektif mengisi celah antarbutir agregat dan pada beberapa aplikasi juga dapat membantu menurunkan kebutuhan suhu pencampuran/pemadatan dibanding campuran konvensional.

### 2.1.3 Agregat

Agregat adalah kumpulan butiran batuan/mineral seperti batu pecah, pasir, dan kerikil yang berasal dari alam atau buatan (SNI No. 1737-1989 F) dan merupakan komponen dominan dalam campuran beraspal (sekitar 90-95% dari berat atau 75-85% dari volume) yang berperan utama menahan beban serta membentuk stabilitas perkerasan. Agregat kasar (tertahan saringan No.4-No.8) memberikan stabilitas melalui *interlocking* dan harus bebas dari lempung/lumpur agar adhesi dengan aspal tidak menurun, sedangkan agregat halus (lolos saringan No.8) membantu mengurangi deformasi permanen melalui gesekan antarpartikel dan *interlocking* dengan proporsi yang perlu dikontrol saat pencampuran.

## 2.2 Analisis Marshall dan Volumetrik

*Marshall test* pengujian yang digunakan untuk mengukur sifat mekanik campuran aspal untuk memastikan kualitas di bawah beban tertentu

1. *Stability* / Stabilitas: Stabilitas bertujuan untuk mengetahui ketahanan dan kekuatan terhadap alur (*rutting*) dan batasan maksimum terjadi keruntuhan pada aspal
2. *Flow* / Kelelahan: Suatu campuran aspal yang memiliki kelelahan yang cukup rendah serta kaku akan dapat mengalami keretakan sebelum usia pelayanan
3. *Marshall Quotient* / Hasil bagi Marshall: Nilai MQ yang tinggi mengindikasikan campuran yang kaku dan tahan terhadap alur (*rutting*), namun jika terlalu tinggi, justru campuran menjadi rapuh (*brittle*) dan mudah retak. Sebaliknya MQ yang rendah menunjukkan campuran yang terlalu fleksibel dan cenderung mudah mengalami deformasi plastik (Liu *et al.*, 2017).

$$MQ = \frac{S}{F} \quad (1)$$

Keterangan:

MQ = *Marshall Quotient* (kg/mm)

S = Nilai *stability* (kg)

F = Nilai *flow* (mm)

4. *Void Filled Bitumen* / Rongga terisi aspal

$$VFB = 100x \left( \frac{VMA - VIM}{VMA} \right) \quad (2)$$

Keterangan:

VFB = *Void Filled Bitumen*

VMA = Rongga di antara mineral agregat

VIM = Rongga di dalam campuran

5. *Void Mineral Aggregate* / Rongga diantara mineral agregat: Jika nilai VMA terlalu rendah, film/lapisan aspal yang menyelimuti agregat menjadi terlalu tipis. Hal ini menyebabkan aspal cepat mengalami oksidasi dan retak. Sebaliknya, VMA yang cukup menjamin durabilitas jangka panjang (Yang *et al.*, 2016)

$$VMA = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} \times \frac{100}{(100+Pb)} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:

Gsb = Bj. Bulk agregat

Gmb = Bj. Bulk campuran padat

Pb = Kadar aspal persen terhadap berat total campuran

6. *Void in Mix* / Rongga di dalam campuran: Nilai VIM sebesar 3-5 % (Standar Bina Marga) adalah angka ideal untuk memastikan campuran cukup padat untuk menahan beban, namun tetap memiliki rongga yang cukup sebagai tempat memuai saat suhu tinggi tanpa menyebabkan ddeformasi (Kaluge, 2019).

$$VIM = 100 \times \frac{GMM \times GMB}{GMM} \quad (4)$$

Keterangan:

GMM = Berat jenis maksimum

GMB = Berat jenis bulk

7. *Density*: Perhitungan *density* harus dilakukan secara seksama, setiap penurunan 1% *density*, baik akibat kesalahan perhitungan Gmb ataupun pemadatan yang kurang dapat menurunkan umur kelelahan (*fatigue life*) hingga sebesar 10-15% dan meningkatkan potensi *rutting* (Zhang *et al.*, 2020)

$$g = \frac{c}{f} f = d - e \quad (5)$$

Keterangan:

c = Berat sampel sebelum direndam (gr/cc)

d = Berat sampel kondisi jenuh (gr)

e = Berat sampel dalam air (gr)

f = Volume (cm<sup>3</sup>)

### 2.3 Analisis Ketahanan Air

*Immersion Test*, hasil dari Indeks Kekuatan Sisa (IKS) *Marshall* adalah rasio antara stabilitas *marshall* sampel perendaman selama 24 jam dengan stabilitas sampel standar. Jika nilai indeks tahanan campuran di atas 90%, sampel dikatakan baik (Mohammadi *et al.*, 2014).

$$Index\ of\ Retained\ Strength = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (6)$$

Keterangan:

S<sub>1</sub> = Stabilitas standar

S<sub>2</sub> = Stabilitas rendaman 24 jam

### 2.4 Analisis Rutting

*Wheel Tracking Machine*, salah satu metode pengujian deformasi permanen yaitu dengan alat *Wheel Tracking Machine*. *Wheel Tracking Machine* merupakan suatu alat pengujian yang digunakan sebagai pengukuran ketahanan perkerasan

aspal terhadap deformasi permanen (*rutting*) akibat beban lalu lintas yang secara berulang-ulang (Fahmi, 2022). Alat pengujian ini bekerja dengan cara sebuah roda yang bergerak secara maju mundur dengan membebani benda uji yang berukuran 30 x 30 x 5 cm<sup>3</sup> dengan temperatur 60°C. Parameter yang dihasilkan pada pengujian tersebut adalah stabilitas dinamis, lajur deformasi dan deformasi permanen. Stabilitas dinamis (DS) merupakan kemampuan material pada campuran aspal untuk mempertahankan bentuk dan struktur menerima beban dengan kondisi yang dinamis. Laju deformasi (RD) merupakan suatu pola di mana deformasi terjadi ketika suatu perkerasan jalan menopang beban. Sedangkan deformasi permanen merupakan perubahan bentuk awal pada suatu perkerasan jalan yang tidak dapat kembali seperti semula.

$$DS = 21 \times 2 \times \frac{(t_2 - t_1)}{(d_2 - d_1)} \quad RD = \frac{(d_2 - d_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (7)$$

Keterangan:

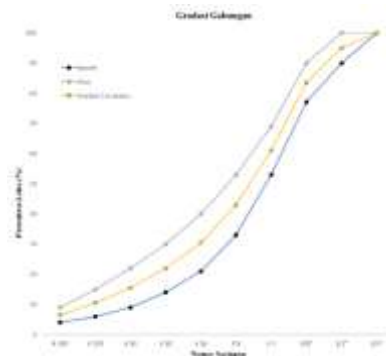
- d<sub>0</sub> = Deformasi permanen kondisi mula-mula
- d<sub>1</sub> = Deformasi 45 menit saat pengujian (mm)
- d<sub>2</sub> = Deformasi 60 menit saat pengujian (mm)
- t<sub>1</sub> = 45 menit (konstanta)
- t<sub>2</sub> = 60 menit (konstanta)

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Karakteristik Material

##### a. Agregat

Perencanaan desain campuran benda uji menggunakan gradasi gabungan batas tengah untuk mendapatkan proporsi masing-masing fraksi agregat, dan menjaga konsistensi gradasi campuran untuk mencapai hasil terbaik (Brake *et al.*, 2016).



Gambar 1 Gradasi Campuran

Tabel 1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

No	Karakteristik	Standar pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis <i>bulk</i>	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,554
2	Berat jenis SSD	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,596
3	Berat jenis <i>apparent</i>	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,665
4	Penyerapan air	SNI 1970:2016	Maks. 3%	1,631
5	Abrasi Los Angeles	SNI 2417:2008	Maks. 40%	5,21%
6	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	SNI 2439:2011	Min. 95%	98%
7	Agregat lolos saringan N0. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 1	0,62%
8	Butir pipih dan lonjong	SNI 8287:2016	Maks.25%	2,99%

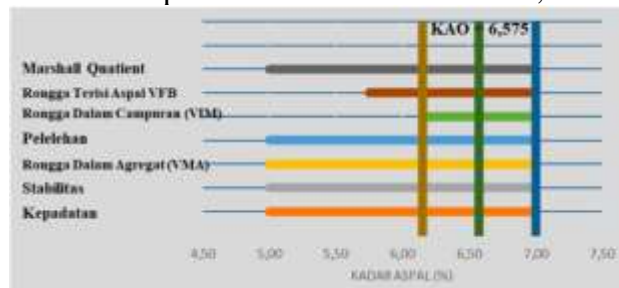
b. Aspal

Penelitian menggunakan dua jenis aspal yang berbeda yaitu Pen 60/70 konvensional dan PG 76 aspal polimer yang ditambahkan zat aditif *Styrene Butadiene Styrene* (SBS) menjadikan aspal tersebut memiliki performa lebih baik dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi atau kerusakan alur terutama pada suhu dan beban lalu lintas yang tinggi (Wang *et al.*, 2025).

Tabel 2 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

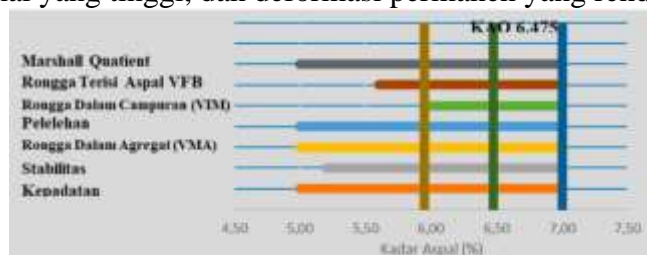
No	Pengujian	Standar Pengujian	Aspal Pen 60/70	PG76
1	Daktalitas	ASTM-D113	>140	57
2	Titik nyala	ASTM D-92	305°C	329
3	Titik lembek	ASTM-D36	49,2	70
4	Berat jenis	ASTM-D70	1,032	1,042
5	Penetrasi	ASTMD-5	62	42

Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan dengan menetapkan rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh persyaratan Marshal (VIM, VMA, VFB, stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient*) berdasarkan spesifikasi umum Bina Marga. Nilai batas bawah ( $P_b$  min) dan batas atas ( $P_b$  max) ditentukan dari irisan seluruh kriteria, kemudian KAO dihitung dari penjumlahan dari nilai batas atas dan nilai batas bawah dibagi dua. Berdasarkan hasil yang diperoleh pada Marshal KAO Campuran Pen 60/70, kadar aspal optimum berada pada 6,575% di mana hasil rata-rata kadar aspal minimum 6,15% dan kadar aspal maksimum 7,0% yang telah memenuhi spesifikasi seluruh volumetrik, stabilitas dan *flow*. Hasil kadar aspal optimum (KAO) pada campuran PG76 berada pada 6,475. Di mana hasil ini didapatkan dari rata-rata kadar aspal minimum 5,95% dan kadar aspal maksimum 7,0% yang telah memenuhi spesifikasi seluruh volumetrik, stabilitas dan *flow*.



Gambar 2 Kadar Aspal Optimum pada campuran aspal Pen 60/70

Penelitian yang dilakukan oleh Montenegro *et al.* (2025) menyebutkan bahwa campuran aspal polimer PG76 akan optimal jika zat aditif polimer SBS dibatasi maksimal 3% dan aditif adhesi sebagai pengikat 0,5%. Formulasi ini mencapai stabilitas Marshal yang tinggi, dan deformasi permanen yang rendah.



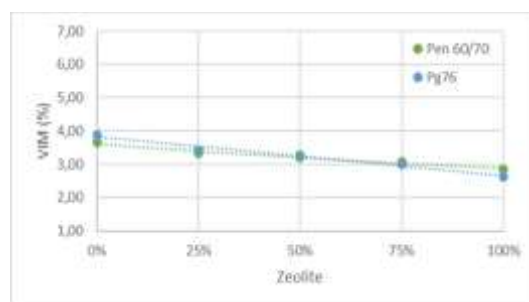
Gambar 3 Kadar Aspal Optimum pada campuran aspal PG 76

### 3.2 Hubungan Variasi Bahan Terhadap Volumetrik Campuran

Penambahan filler zeolit pada campuran aspal PG76 memberikan perubahan yang signifikan pada nilai volumetrik yaitu VIM, VMA dan VFB. Perubahan tersebut diakibatkan karakteristik fisik dan kimia yang terdapat dalam kandungan zeolit. Zeolit mengandung silica dan alumina yang cukup tinggi serta memiliki struktur berpori dan ukuran partikel yang halus efektif mengisi celah atau rongga kosong dalam campuran sehingga terjadi penurunan pada nilai VIM dan terjadi penurunan pada nilai VMA di mana filler zeolit mampu mengisi pori-pori kecil (mikro) dalam agregat mineral sehingga meningkatkan kepadatan dalam seluruh campuran. Sedangkan nilai VFB terjadi peningkatan karena zeolit dengan aspal mampu meningkatkan adhesi dan distribusi aspal dalam campuran, aspal menyebar dan menempel di antara partikel agregat dalam campuran aspal. Di mana pori-pori halus dalam zeolit mendukung aspal mengisi void secara optimal, memberikan ikatan yang lebih kuat antar agregat dengan aspal. Kemudian, penambahan filler zeolit pada campuran aspal Pen 60/70 menghasilkan nilai VIM dan VMA menurun di mana ruang kosong dalam campuran berkurang dan bertambahnya kepadatan agregat (Irianto *et al.*, 2020). Sedangkan nilai VFB meningkat di mana bitumen lebih efektif mengisi ruang yang tersisa. Hal ini dapat dinyatakan bahwa pori halus dalam zeolit mampu mengisi ruang mikroskopis (ruang yang berada skala mikro hingga nano) dan meningkatkan adhesi antar agregat dengan aspal sehingga campuran lebih padat dan kuat dengan stabilitas mekanis meningkat. Dengan demikian, perbedaan efek filler zeolit pada volumetrik dari kedua jenis aspal tersebut baik itu aspal Pen 60/70 dan PG76 dapat juga disebabkan oleh sifat fisik seperti perbedaan kekakuan dan viskositas aspal.

Tabel 3 Hubungan kadar zeolit terhadap VIM

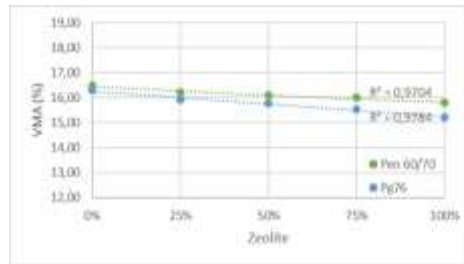
No	Kadar Zeolit (%)	VIM Pen 60/70 (%)	VIM PG76 (%)
1	0	3,75	3,95
2	25	3,40	3,50
3	50	3,25	3,30
4	75	3,10	3,05
5	100	2,95	2,70



Gambar 4 Hubungan VIM dengan kadar zeolite

Tabel 4 Hubungan kadar zeolit terhadap VMA

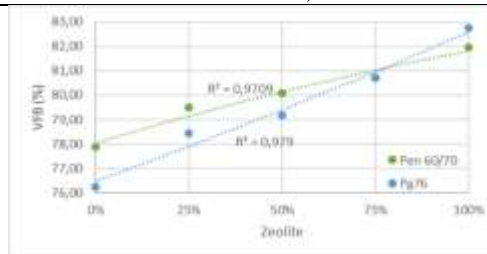
No	Kadar Zeolit (%)	VMA Pen 60/70 (%)	VMA PG76 (%)
1	0	16,55	16,35
2	25	16,30	16,05
3	50	16,15	15,85
4	75	16,05	15,60
5	100	15,85	15,25



Gambar 5 Hubungan VMA dengan Kadar Zeolit

Tabel 5 Hubungan kadar zeolit terhadap VFB

No	Kadar Zeolit (%)	VFB Pen 60/70 (%)	VFB PG76 (%)
1	0	77,95	76,40
2	25	79,55	78,50
3	50	80,20	79,30
4	75	81,15	80,80
5	100	82,10	82,85



Gambar 6 Hubungan VFB dengan Kadar Zeolit

Penambahan zeolit sebagai filler pada campuran aspal Pen 60/70 dan aspal Pg76 memberikan pengaruh yang berbeda terhadap volumetrik campuran dan sifat mekanik campuran. Campuran Pen 60/70 dengan zeolit memiliki nilai korelasi positif terhadap kepadatan yaitu sebesar 0,69 yang menunjukkan bahwa penambahan zeolit meningkatkan kepadatan campuran. Volumetrik campuran seperti VIM dan VMA memiliki korelasi negatif sedang yaitu sebesar -0,69. Hal tersebut menunjukkan penambahan zeolit pada campuran aspal Pen 60/70 dapat menurunkan rongga udara pada campuran aspal.

Tabel 6 Nilai Korelasi Volumetrik Campuran

Jenis Campuran	Density	VIM	VMA	VFB	Stabilitas	Flow
Pen 60/70 t	0,69	-0,69	-0,69	0,70	0,54	0,17
Pg76 zeolit	0,89	-0,89	-0,89	0,89	0,51	0,08

Tabel 7 Nilai F dan P pada Campuran Aspal

Karakteristik Volumetrik		PG76	Pen 60/70
VIM	<i>F-Value</i>	96,83	43,17
	<i>F-Crit</i>	3,48	3,48
	<i>P-Value</i>	0,00000006	0,0000028
VMA	<i>F-Value</i>	96,83	43,17
	<i>F-Crit</i>	3,48	3,48
	<i>P-Value</i>	0,00000006	0,00000282
VFB	<i>F-Value</i>	94,67	43,63
	<i>F-Crit</i>	3,48	3,48
	<i>P-Value</i>	0,000000066	0,000002678

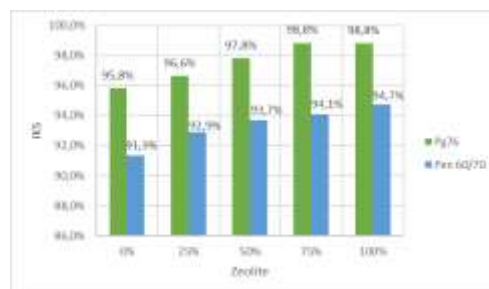
Nilai korelasi penambahan zeolit terhadap rongga terisi aspal (VFB) sebesar 0,70 menunjukkan aspal dapat mengisi rongga lebih efisien. Pada campuran aspal Pg76, penambahan zeolit sebagai filler memiliki pengaruh yang signifikan terhadap volumetrik campuran yaitu VIM, VMA dan VFB dengan nilai korelasi *pearson* sebesar -0,89 menunjukkan bahwa penambahan zeolit sebagai filler pada campuran aspal menyebabkan terjadinya pengurangan signifikan rongga udara dalam campuran. Nilai korelasi zeolit terhadap stabilitas campuran berada pada rentang yang sedang, menunjukkan bahwa peningkatan stabilitas campuran yang sedang akibat penambahan zeolit pada kedua campuran (Alonso *et al.*, 2020 dan Liu *et al.*, 2023).

### 3.3 Pengaruh Zeolit Terhadap Indeks Kekuatan Sisa (IKS)

Nilai Indeks kekuatan sisa yang diperoleh pada penelitian ini mengalami peningkatan. Pada campuran aspal Pen 60/70 dengan filler zeolit, nilai indeks kekuatan sisa sebesar 91,3% hingga 94,7% dan campuran aspal Pg76 dengan filler zeolit, nilai indeks kekuatan sisa sebesar 95,8% hingga 98,8%. Di mana campuran Pg76 yang konsisten nilai IKS lebih tinggi dibandingkan Pen 60/70, yang berarti memiliki parameter volumetrik yang lebih optimal dibandingkan Pen 60/70. Nilai Volumetrik seperti VIM VMA dan VFB memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai indeks kekuatan sisa (IKS) pada campuran kedua jenis aspal tersebut dengan filler. Nilai VIM yang menurun menunjukkan bahwa porositas campuran lebih sedikit sehingga campuran lebih padat dan kuat, hal ini merupakan salah satu yang membantu peningkatan nilai IKS karena campuran mampu menahan deformasi serta kerusakan yang lebih baik. Nilai VMA yang masih memenuhi spesifikasi atau terbilang optimal menunjukkan bahwa ruang yang cukup di antara agregat untuk diisi aspal sehingga ikatan antar partikel menjadi kuat dan memperbaiki kohesi dan adhesi campuran yang memberikan dampak positif untuk nilai IKS. Nilai VFB yang tinggi meningkatkan daya tahan campuran akibat beban siklik atau kelembaban.

Tabel 8 Hubungan kadar zeolit terhadap Indeks Kekuatan Sisa

No	Kadar Zeolit (%)	IKS Pen 60/70 (%)	IKS PG76 (%)
1	0	91,30	95,80
2	25	92,90	96,60
3	50	93,70	97,80
4	75	94,10	98,80
5	100	94,70	98,80



Gambar 7 Hubungan IKS dengan Kadar Zeolit

Perubahan nilai volumetrik oleh filler zeolit juga secara langsung mampu meningkatkan kemampuan campuran aspal untuk mempertahankan kekuatan setelah menerima beban yang diukur melalui nilai IKS. Temuan tersebut juga didukung oleh penelitian sebelumnya yang menunjukkan penggunaan zeolit sebagai filler memberikan peningkatan adhesi antara aspal dengan agregat yang menyebabkan peningkatan sensitivitas campuran aspal terhadap kerusakan akibat kelembaban (Arabani *et al.*, (2021), Liu *et al.*, (2024) dan Mahdi *et al.*, (2024)).

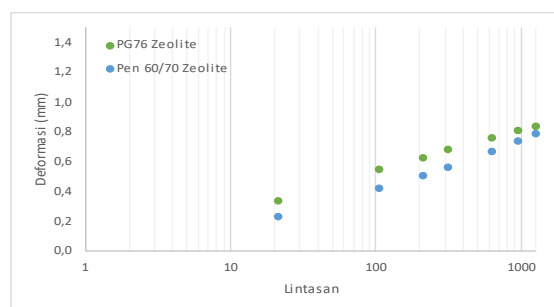
### 3.4 Analisis Kinerja Rutting

Temperatur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai deformasi pada campuran aspal Pg 76 dan aspal Pen 60/70 dengan bahan tambah filler. Hasil pengujian menunjukkan bahwa deformasi meningkat seiring dengan peningkatan lintasan beban siklik pada temperatur pengujian 25°, 45° dan 60°. Nilai deformasi meningkat drastis seiring meningkatnya suhu pengujian *Wheel Tracking Machine* hingga 60° terutama pada campuran aspal Pen 60/70 sehingga aspal menjadi lunak dan lebih rentan terhadap deformasi plastis permanen. Bahan tambah filler zeolit mampu meningkatkan kohesi dan adhesi antar partikelnya sehingga mengurangi deformasi permanen ketika menerima beban secara berulang, terutama pada campuran aspal Pg 76 yang memiliki kestabilan yang lebih tinggi dibandingkan aspal Pen 60/70.

Pada suhu 25°, nilai deformasi aspal Pg 76 lebih tinggi dibandingkan Pen 60/70 dan pada suhu 45° dan 60° nilai deformasi Pen 60/70 lebih tinggi dibandingkan aspal Pg 76. Hal ini dipengaruhi oleh aspal Pg 76 memiliki kestabilan yang lebih tinggi pada suhu temperatur tinggi sehingga menunjukkan aspal lebih rentan terhadap deformasi ketika menerima beban secara berulang di suhu yang rendah. Sedangkan aspal Pen 60/70 cenderung mengalami deformasi yang lebih cepat di suhu tinggi karena aspal menjadi lunak.

Tabel 9 Tabel data kinerja rutting (Temperatur 25°C)

No	Jenis Aspal	Filler	Waktu (Menit)	Lintasan (Passing)	Deformasi (mm)
1	Pen 60/70	Zeolit Optimum	1	21	0,23
2	Pen 60/70	Zeolit Optimum	60	1260	0,79
3	PG76	Zeolit Optimum	1	21	0,34
4	PG76	Zeolit Optimum	60	1260	0,84



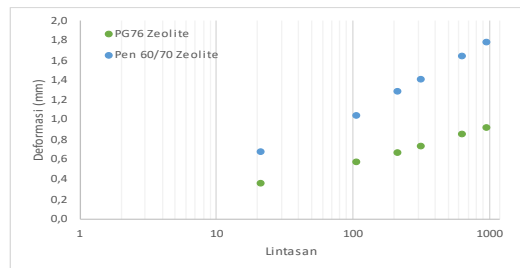
Gambar 8 Hasil Deformasi dengan temperatur 25°C

Deformasi permanen mengalami peningkatan yang cukup drastis pada temperatur 60°. Pada temperatur rendah 25°, total deformasi relatif rendah yaitu pada campuran aspal Pen 60/70 sebesar 0,84 mm dan campuran aspal Pg 76 sebesar

0,79 mm. Pada temperatur menengah 45°, total deformasi mengalami peningkatan yaitu campuran aspal Pen 60/70 sebesar 1,89 mm dan campuran aspal Pg 76 sebesar 0,97 mm. Pada temperatur tinggi 60°, total deformasi jauh lebih meningkat yaitu campuran aspal Pen 60/70 sebesar 5,41 mm dan campuran aspal Pg 76 sebesar 3,62 mm. Terlihat juga aspal Pen 60/70 lebih tinggi total deformasi dibandingkan aspal Pg 76. Hal ini disebabkan oleh aspal PG 76 memiliki viskoelastisitas yang lebih tinggi sehingga mampu mempertahankan struktur menahan deformasi plastis lebih baik walaupun berada di temperatur yang tinggi.

Tabel 10 Tabel data kinerja rutting (Temperatur 45°C)

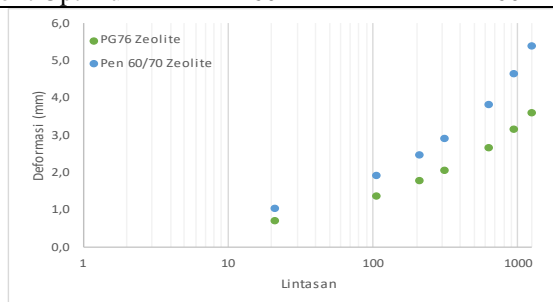
No	Jenis Aspal	Filler	Waktu (Menit)	Lintasan (Passing)	Deformasi (mm)
1	Pen 60/70	Zeolit Optimum	1	21	0,68
2	Pen 60/70	Zeolit Optimum	60	1260	1,89
3	PG76	Zeolit Optimum	1	21	0,36
4	PG76	Zeolit Optimum	60	1260	0,97



Gambar 9 Hasil Deformasi dengan Temperatur 45°C

Tabel 11 Tabel data kinerja rutting (Temperatur 60°C)

No	Jenis Aspal	Filler	Waktu (Menit)	Lintasan (Passing)	Deformasi (mm)
1	Pen 60/70	Zeolit Optimum	1	21	0,68
2	Pen 60/70	Zeolit Optimum	60	1260	1,89
3	PG76	Zeolit Optimum	1	21	0,36
4	PG76	Zeolit Optimum	60	1260	0,97



Gambar 10 Hasil Deformasi dengan Temperatur 60°C

Adanya penambahan filler zeolit mampu meningkatkan kekakuan pada kedua campuran aspal tersebut, namun pemilihan variasi bahan aspal PG 76 dan temperatur normal pengujian yang digunakan dapat menjamin performa mekanik campuran yang lebih stabil di berbagai kondisi temperatur. Hasil penelitian ini selaras dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa suhu tinggi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pelunakan aspal. Peningkatan suhu menyebabkan kekakuan aspal menurun, di mana dari keadaan padat yang keras pada suhu rendah kemudian mengalami pelunakan pada suhu tinggi hingga masuk

ke keadaan mengalir dan dengan pembebanan berulang deformasi permanen pada campuran aspal menumpuk secara bertahap menyebabkan terbentuknya *rutting*.

Hasil pengujian WTM yang tercantum dalam Tabel 9, Tabel 10 dan Tabel 11 mendukung analisis karakteristik kinerja *rutting* menggunakan fungsi *power-law* yang diwakili oleh persamaan  $y = a \times x^b$ . Dalam persamaan tersebut, konstanta *a* menunjukkan nilai deformasi pada tahap awal, sedangkan konstanta *b* mempresentasikan pertambahan kedalaman deformasi (*ruth depth*) seiring peningkatan suhu pengujian. Pada pengujian aspal PG76, diperoleh nilai *a* sebesar 0,0142 dan *b* sebesar 0,6712 pada suhu 25°C. Saat suhu dinaikkan menjadi 45°C, nilai konstanta *a* meningkat menjadi 0,0151 dan konstanta *b* menjadi 0,6767. Selanjutnya, pada suhu 60°C, nilai konstanta *a* sebesar 0,0311 dan konstanta *b* menjadi 0,7334. Sedangkan pada aspal pen 60/70, nilai konstanta *a* sebesar 0,0122 dan konstanta *b* sebesar 0,6645 pada suhu 25°C; Pada suhu 45°C, nilai konstanta *a* sebesar 0,0239 dan konstanta *b* sebesar 0,7091 serta pada suhu 60°C nilai konstanta *a* sebesar 0,0404 dan konstanta *b* sebesar 0,7515. Data ini mengindikasikan bahwa campuran aspal Pen 60/70 memiliki kedalaman deformasi awal yang lebih besar dibandingkan aspal PG76. Selain itu, hasil tersebut menegaskan bahwa suhu berperan signifikan dalam meningkatkan kedalaman deformasi campuran aspal.

Tabel 12 Nilai Konstanta Deformasi Campuran PG76 Zeolit

No	PG76 Zeolit	a	b	r <sup>2</sup>
1	25	0,0142	0,6712	0,7235
2	45	0,0151	0,6767	0,7796
3	60	0,0311	0,7334	0,9368

Tabel 13. Nilai Konstanta Deformasi Campuran Pen 60/70 Zeolit

No	Pen 60/70 Zeolit	a	b	r <sup>2</sup>
1	25	0,0122	0,6645	0,8466
2	45	0,0239	0,7091	0,7894
3	60	0,0404	0,7515	0,949

#### 4. Kesimpulan dan Saran

##### 4.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi kadar zeolit alam dan jenis pengikat mempengaruhi karakteristik volumetrik serta ketahanan *rutting* campuran AC-WC. Kadar aspal optimum (KAO) yang memenuhi seluruh persyaratan diperoleh sebesar 6,575% untuk campuran Pen 60/70 dan 6,475% untuk campuran PG76. Berdasarkan evaluasi Marshall, kadar zeolit optimum berturut-turut adalah 25% (Pen 60/70) dan 50% (PG76) dengan parameter volumetrik dan Indeks Kekuatan Sisa yang tetap berada pada batas spesifikasi.

Pada pengujian *Wheel Tracking Machine*, peningkatan temperatur uji dari 25°C ke 60°C meningkatkan deformasi permanen dan menurunkan stabilitas dinamis seluruh campuran. Namun, campuran dengan pengikat PG76 menunjukkan deformasi yang lebih rendah dibanding Pen 60/70 pada temperatur yang sama. Kinerja *rutting* terbaik dicapai oleh campuran PG76 pada 50% zeolit dengan stabilitas dinamis 1431,82 lintasan/mm (lebih tinggi dibanding dengan Pen 60/70 dengan 25% zeolit sebesar 828,95 lintasan/mm), sehingga lebih sesuai untuk kondisi lalu lintas berat dan suhu layanan tinggi.

## 4.2 Saran

Penggunaan aspal PG76 dengan filler zeolit sangat direkomendasikan untuk perkerasan jalan di wilayah beriklim panas dan beban lalu lintas berat karena ketahanannya yang tinggi terhadap deformasi permanen. Dalam aplikasinya, penggunaan kadar *filler* zeolit sebaiknya dioptimalkan pada rentang 25% hingga 50% untuk menjaga keseimbangan antara stabilitas dan karakteristik volumetrik campuran. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian kinerja kelelahan (*fatigue*) dan evaluasi ketahanan campuran terhadap variasi beban roda yang lebih ekstrem guna memastikan durabilitas jangka panjang di lapangan.

## Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai melalui hibah pendanaan Institut Teknologi Sumatera Tahun Anggaran 2025, Nomor: 1998c/IT9.2.1/PT.01.03/2025

## Daftar Kepustakaan

- Alonso, A., Tejada, E., Moreno, F., Rubio, M.C., dan Medel, E. (2013) “Estudio de laboratorio sobre utilización de zeolita natural versus zeolita sintética en la fabricación de mezclas semicalientes,” *Materiales de Construcción*, Vol.63, No.310, pp. 195–217. Available at: <https://doi.org/10.3989/mc.2013.05911>
- Alonso, E.S., Vidal, G.V., dan Floody, A.C. (2020). “Experimental Study to Design Warm Mix Asphalts and Recycled Warm Mix Asphalts Using Natural Zeolite as Additive for Sustainable Pavements”. *Sustainability*. Vol.12, No.980, pp.1-13. Available at <https://doi.org/10.3390/su12030980>
- Arabani, M., Purbasti, Z.R., dan Hamedi, G.H. (2021). “Investigating The Impact of Zeolite on Reducing The Effects of Changes in Runoff Acidity and The Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures”. *Construction and Building Materials*. Vol.268, No.121071, pp.1-14. Available at <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121071>
- Bichajło, L., Gardziejczyk, W., Gierasimiuk, P., Kolodziej, K., Kowalski, K., Malinowski, S., Siwowski, T., dan Wasilewska, M. (2025) “Effect of the Addition of Zeolites on the Resistance to Permanent Deformations of Mastic Asphalt Bridge Pavement”. *Materials*. Vol.18, No.18, p. 4325. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma18184325>
- Brake, N. A., Allahdadi, H., dan Adam, F. (2016). “Flexural Strength and Fracture Size Effects of Pervious Concrete”. *Construction and Building Materials*. Vol.113, pp.536-543. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.04>
- Fahmi, D. (2022). “Pemodelan Elemen Hingga Dari Kinerja Deformasi Permanen Material Campuran Beraspal Ac-Wc Pada Pengujian Hamburg Wheel Tracking Device”. Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya. Institut Teknologi Bandung.
- Handayani, A.T., Peni, S.N. and Pandita, H. (2019) “Marshall Immersion Test of Warm Mix Asphalt Polymer Using Bayat Natural Zeolite”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing.

- Vol.602, No.012106. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/602/1/012106>
- Irianto, Tumpu, M., dan Parung, H. (2020), "Volumetric Characteristics of HRS-WC Mixed Using Petroleum Bitumen Grade 60/70 as Binder". IOP Conf.Series: Earth and Environmental Science. Vol.921, No.012069, pp.1-8. Available at <https://doi.org/10.1088/1755-1315/921/1/012069>
- Jaleel, M.M., Albdairi, M. and Almusawi, A. (2025) "Marshall-Based Thermal Performance Analysis of Conventional and Polymer-Modified Asphalt Binders". *Construction Materials*. Vol.5, No.2, pp.1-19. Available at: <https://doi.org/10.3390/constrmater5020040>
- Kaluge, A.H. (2019). "Metacognition, Self-Efficacy, and Mathematics Learning Achievement: A Study Based on Gender Differences". *Journal of Physics: Conference Series*. Vol.1375, No.012012, pp.1-8. Available at <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1375/1/012012>
- Li, P., Fu, J., Sun, L., Yue, J., dan Zang, Q. (2025) "Analysis of Rutting Formation Mechanisms and Influencing Factors in Asphalt Pavements Under Slow-Moving Heavy Loads," *Materials*, Vol.18, No.17, p. 4153. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma18174153>
- Liu, J., Wang, K., Zhang, Q., Han, F, Sha, J., dan Liu, J. (2017). "Influence of Superplasticizer Dosage on The Viscosity of Cement Paste with Low Water-Binder Ratio". *Construction and Building Materials*. Vol.149, pp.359-366. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.145>
- Liu, N., Liu, L., Li, M., dan Sun, L. (2023). "Effects of Zeolite on Rheological Properties of Asphalt Materials and Asphalt-Filler Interaction Ability". *Construction and Building Materials*. Vol.382, No.131300, pp.1-18. Available at <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131300>
- Liu, N., Liu, L., Zhang, Z., Li. M., dan Sun, L. (2024). "Study on Cohesion and Adhesion Behaviors of The Zeolite Foamed Asphalt-Warm Mix Mixture Based on Molecular". *Case Study in Construction Materials*. Vol.21, No.e03424, pp.1-17. Available at <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03424>
- Ma, X., Li, Q., Cui, Y.C., dan Ni, A.Q. (2018) "Performance of Porous Asphalt Mixture with Various Additives," *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.19, No.4, pp. 355–361. Available at: <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1175560>
- Mahdi, N.J., Jehad, A.E., Mahdi, L.M.J., dan Akhlagbi, T. (2024). "Assessment of Moisture Damage for Warm Mix Asphalt Incorporated with Synthetic and Natural Zeolite". *AIP Conference Proceedings*. The 5<sup>th</sup> International Conference on Buildings, Construction, and Environmental Engineering: BCEES. Vol.3219, Issue 1. Available at <https://doi.org/10.1063/5.0236409>
- Manurung, E. H., Sawito, K., Satoto, A., dan Tuanany, N. (2022) "Analysis of the Cause of Road Damage," *CIVILA*, 7(1), pp. 87–96. Available at: <https://doi.org/10.30736/cvl.v7il.793>
- Mohammadi, I., Khabbaz, H., dan Vessalas, K. (2014). "In-Depth Assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) Prepared by Water-Soaking Treatment Method for Rigid Pavements". *Construction and Building Materials*. Vol.71, pp.456-471. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.085>

- Montenegro, M.A.R., Vásquez, D.E.S., Cerveto, M.A.S., dan Gutiérrez, A.O. (2025). "Physical-Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Modified with Polymers and Adhesion Additive, District of Mancora-Peru". *Civil Engineering and Architecture*. Vol.13, No.5, pp.3688-3703. Available at <https://doi.org/10.13189/cea.2025.130517>
- Pataras, M., Kadarsa, E., Permata, D., Khairunnisa, S., Akbar, M.A., dan Pratama, Y. (2021). "Index of Retained Strength and Weight Loss on Flexible Pavement Ac-Wc and Hrs-Wc Using Polymer Products Ethylene-Vinyl-Acetate (EVA) and Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)". *Atlantis Highlights in Engineering*, Vol.7, pp. 249-260. Available at <https://doi.org/10.2991/ahe.k.210205.045>
- Riyad, R.H., Jaiswal, R., Muhit, I.B., dan Shen, J. (2024) "Optimizing Modified Asphalt Binder Performance at High and Intermediate Temperatures Using Experimental and Machine Learning Approaches," *Construction and Building Materials*, 449, 138350. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138350>
- Rys, D., Judycki, J. dan Jaskula, P. (2016) "Analysis of Effect of Overloaded Vehicles on Fatigue Life of Flexible Pavements Based on Weigh in Motion (WIM) Data," *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.17, No.8, pp. 716–726. Available at: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019493>
- Stimilli, A., Canestrari, F., Teymourpour, P., dan Bahia, H.U. (2015). "Low-Temperature Mechanics of Hot Recycled Mixtures Through Asphalt Thermal Cracking Analyzer (ATCA)". *Construction and Building Materials*. Vol.85, pp. 54-65. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.047>
- Wang, B., Wang, R., Wang, J., Xu, J., Xu, Q., dan Yu, W. (2025). "Comparative Study on Aging Mechanisms of SBS-Modified Bitumen Under Thermal-Oxidate and Vacuum Conditions: Implications for Viscoelasticity". *Materials and Structures*. Vol.58, No.166, pp.1-16. Available at <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02674-1>
- Wozuk, A., Wróbe, M., dan Franus, W. (2020) "Application of Zeolite Tuffs as Mineral Filler in Warm Mix Asphalt," *Materials*, Vol.13, No.1. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13010019>
- Yang, J.M., Kim, J.K., dan Yoo, D.Y. (2016). "Effects of Amorphous Metallic Fibers on The Properties of Asphalt Concrete". *Construction and Building Materials*. Vol.128, pp.176-184. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.082>
- Zhang, H., Xu, Y., Gan, Y., Chang, Z., Schlangen, E., dan. Savija, B. (2020). "Microstructure Informed Micromechanical Modelling of Hydrated Cement Paste: Techniques and Challenges". *Construction and Building Materials*. Vol.251, No.118983, pp.1-20. Available at <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118983>