

Kinerja Aspal Porus Termodifikasi Gilsonite: Penilaian Ketahanan Campuran

Muhamad Anugerah Ramadhan^a, Nina Herlina^b, Herianto^c, Sri Wanto^d
^{a,b,c,d} Universitas Siliwangi, Tasikmalaya

*Corresponding author, email address: anugerahramadhan@unsil.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 Januari 2026

Revised: 6 Februari 2026

Accepted: 15 Maret 2026

Available Online: 30 April 2026

Kata Kunci:

Aspal Porus, Gilsonite, Kadar Aspal Optimum, Marshall

Keywords:

Porous Asphalt, Gilsonite, Optimum Asphalt Content, Marshall

ABSTRAK

Aspal porus dikembangkan untuk meningkatkan drainase permukaan dan keselamatan berkendara, namun campuran bergradasi terbuka umumnya memiliki stabilitas dan durabilitas yang lebih rendah. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh aditif Gilsonite terhadap kinerja campuran aspal porus menggunakan aspal Pen 60/70 dan agregat lokal. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan dengan mengintegrasikan kriteria volumetrik (VIM), ketahanan raveling (Cantabro Loss), dan stabilitas terhadap pemisahan binder (Asphalt Flow Down/AFD). Hasil menunjukkan bahwa kenaikan kadar aspal menurunkan VIM dan Cantabro Loss, tetapi meningkatkan AFD; berdasarkan kompromi ketiga parameter tersebut diperoleh KAO sebesar 5,58% dengan AFD sekitar 0,19% atau lebih rendah dari batas maksimum 0,3%. Pada KAO tersebut, variasi Gilsonite 0-3% meningkatkan karakteristik Marshall secara konsisten. Stabilitas meningkat dari 556,20 kg menjadi 694,04 kg atau sekitar 24,78%, sedangkan MQ meningkat dari 149,03 menjadi 208,24 kg/mm atau sekitar 39,73%. Flow tetap berada pada rentang 2-6 mm dan VIM tetap memenuhi spesifikasi aspal porus sekitar 18,04-18,36%, sehingga struktur pori tidak terkompromi. Uji perendaman menunjukkan ketahanan terhadap air yang baik dengan IRS 90,33-90,83% serta penurunan indikator degradasi (IDP dan IDK) seiring kenaikan kadar Gilsonite. Efektivitas Gilsonite 3% dijustifikasi oleh kombinasi peningkatan stabilitas, kekakuan, dan durabilitas basah tanpa menurunkan porositas di bawah batas spesifikasi; oleh karena itu, kadar ini menjadi formulasi terbaik pada kondisi material dan rancangan campuran penelitian ini.

ABSTRACT

Porous asphalt is designed to improve surface drainage and driving safety, yet open-graded mixtures commonly suffer from limited stability and durability. This study investigates the effect of Gilsonite additive on porous asphalt performance using Pen 60/70 binder and local aggregates. The optimum asphalt content (OAC) was determined by integrating volumetric criteria (VIM), raveling resistance (Cantabro Loss), and binder drain-down stability (Asphalt Flow Down/AFD). The results indicate that increasing binder content decreases VIM and Cantabro Loss but markedly increases AFD; therefore, a balanced OAC of 5.58% was obtained with AFD of approximately 0.19%, which is below the maximum limit of 0.3%. At this OAC, Gilsonite contents of 0-3% consistently improved Marshall properties. Stability increased from 556.20 kg to 694.04 kg, or approximately 24.78%, while MQ increased from 149.03 to 208.24 kg/mm, or approximately 39.73%. Flow remained within 2-6 mm and VIM satisfied porous asphalt requirements at approximately 18.04-18.36%, indicating that the air-void structure was preserved. Immersion testing confirmed adequate moisture resistance, with IRS of 90.33-90.83% and decreasing degradation indicators (IDP and IDK) as Gilsonite content increased. The effectiveness of 3% Gilsonite is justified by the simultaneous improvement in stability, stiffness, and moisture durability without reducing porosity below the specification limit; therefore, this dosage represents the best formulation under the material conditions and mixture design adopted in this study.



1. PENDAHULUAN

Jalan berperan sebagai prasarana utama transportasi darat yang menentukan kelancaran mobilitas masyarakat dan distribusi logistik. Pada kondisi iklim tropis seperti di Indonesia, kinerja perkerasan sering menurun akibat kombinasi air hujan dan beban lalu lintas. Sejumlah laporan menyebutkan bahwa porsi kerusakan jalan dipengaruhi secara signifikan oleh air serta kelebihan muatan [1]. Kondisi tersebut mendorong kebutuhan akan material perkerasan yang tidak hanya mampu menahan beban, tetapi juga memiliki ketahanan terhadap rembesan air, oksidasi, dan penurunan kualitas akibat lingkungan basah, sehingga keselamatan dan kenyamanan berkendara dapat terjaga [2, 3]. Gilsonite berpotensi digunakan sebagai modifier karena material ini merupakan hidrokarbon aspal alami dengan kandungan fraksi berat, terutama asphaltene dan resin, yang tinggi. Pada saat dicampurkan dengan aspal Pen 60/70 melalui proses basah, partikel Gilsonite terdispersi dan berinteraksi secara fisik-koloidal dengan fraksi maltene aspal. Interaksi tersebut mengubah keseimbangan SARA binder, menurunkan nilai penetrasi, menaikkan titik leleh dan viskositas, serta membentuk film binder yang lebih kaku dan kohesif [4, 10, 13, 24]. Secara fisika, film binder yang lebih tebal dan stabil dapat memperkuat kontak aspal-agregat, mengurangi peluang stripping akibat masuknya air, serta menekan deformasi permanen pada temperatur layanan tinggi. Secara kimia, peningkatan durabilitas lebih tepat dijelaskan sebagai perubahan komposisi dan struktur koloid binder, bukan sebagai reaksi kimia baru yang dominan antara Gilsonite dan aspal. Oleh karena itu, penambahan Gilsonite perlu dievaluasi tidak hanya melalui stabilitas Marshall, tetapi juga melalui parameter rongga, drain-down, raveling, dan ketahanan perendaman agar efektivitasnya pada aspal porus dapat dijelaskan secara lebih menyeluruh.

2. KAJIAN PUSTAKA

Salah satu pendekatan yang dikembangkan untuk mengurangi masalah genangan dan meningkatkan keselamatan pada musim hujan adalah penggunaan aspal porus. Aspal porus dirancang dengan kadar rongga udara yang lebih tinggi daripada campuran beraspal konvensional karena komposisi agregat halusanya lebih sedikit [3, 5]. Rongga yang besar membentuk tekstur permukaan yang lebih kasar sehingga kekesatan meningkat, sekaligus menyediakan jalur aliran air agar air hujan dapat cepat menembus dan keluar dari permukaan perkerasan menuju sistem drainase [6]. Karena itu, aspal porus umum diposisikan sebagai lapis permukaan (*wearing course*) pada perkerasan yang membutuhkan kemampuan drainase permukaan dan peningkatan keselamatan lalu lintas [3]. Meskipun memiliki keunggulan dari sisi permeabilitas, aspal porus cenderung menghadapi keterbatasan stabilitas dan durabilitas. Rongga antar-agregat yang tinggi dapat menurunkan kekuatan internal campuran dan meningkatkan kerentanan terhadap kerusakan, khususnya ketika air masuk dan melemahkan ikatan aspal-agregat [7, 8]. Oleh karena itu, banyak penelitian mengarahkan perbaikan kinerja aspal porus melalui modifikasi binder atau penambahan aditif untuk meningkatkan stabilitas, ketahanan terhadap deformasi permanen, serta ketahanan terhadap pengaruh air. Dengan kata lain, tantangan utama aspal porus adalah mencapai kompromi yang seimbang antara fungsi drainase dan ketahanan struktural [3, 9].

Salah satu modifier yang banyak diteliti adalah Gilsonite, yaitu hidrokarbon alami berwarna coklat dengan kemurnian tinggi dan kadar abu relatif kecil. Gilsonite dilaporkan dapat meningkatkan karakteristik campuran beraspal melalui perbaikan kekakuan, stabilitas termal, dan kohesi binder, sehingga potensi peningkatan ketahanan terhadap deformasi permanen dan kerusakan akibat air menjadi lebih besar. Mekanisme utamanya berkaitan dengan peningkatan fraksi asphaltene-resin dalam binder termodifikasi, yang menyebabkan penetrasi menurun, titik leleh meningkat, dan viskositas bertambah. Kondisi ini menghasilkan lapisan binder yang lebih resisten terhadap aliran pada temperatur tinggi dan lebih mampu mempertahankan ikatan dengan agregat saat campuran terpapar air [4, 10, 13, 24]. Temuan empiris menunjukkan bahwa peningkatan kadar Gilsonite cenderung meningkatkan nilai stabilitas campuran pada pengujian Marshall, dengan kadar tertentu memberikan performa yang memenuhi spesifikasi yang dirujuk [4, 10, 11]. Beberapa studi pada campuran beraspal juga melaporkan bahwa penggunaan Gilsonite dapat memperbaiki ketahanan campuran terhadap kerusakan yang dipengaruhi air dibandingkan campuran tanpa aditif [13]. Namun, evaluasi yang terintegrasi pada aspal porus dengan mempertimbangkan stabilitas, durabilitas, ketahanan raveling, dan stabilitas terhadap drain-down masih perlu dipertegas pada kondisi material dan rancangan campuran yang digunakan di Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan Gilsonite pada kinerja aspal porus melalui parameter-parameter kunci perkerasan, seperti stabilitas dan kelelahan (*flow*), Marshall Quotient (MQ), rongga campuran (VIM), serta indikator ketahanan terhadap

kerusakan yang relevan untuk kondisi basah dan beban lalu lintas. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar teknis pemilihan kadar Gilsonite yang lebih rasional untuk meningkatkan performa aspal porus tanpa menghilangkan fungsi drainasenya [4, 10, 13].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Materials

Agregat kasar dan agregat halus diperoleh dari Clereng, Kulon Progo, Yogyakarta. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 produksi PT Pertamina (Cilacap). *Gilsonite* digunakan sebagai bahan aditif untuk memodifikasi binder. Karakterisasi awal material dilakukan sesuai Spesifikasi Bina Marga (2018) untuk agregat dan aspal dasar. Pengujian mencakup parameter fisik agregat (gradasi, berat jenis, penyerapan) serta karakteristik aspal penetrasi 60/70 sebelum dan sesudah modifikasi. Tahap ini bertujuan memastikan seluruh material memenuhi persyaratan teknis sebelum digunakan dalam pencampuran.

3.2 Mixture Design and Gilsonite Modification

Gradasi campuran aspal porus disusun berdasarkan spesifikasi Asphalt Pavement Association (2004) untuk open graded friction course. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan melalui metode Marshall dengan mempertimbangkan parameter stabilitas, flow, rongga dalam campuran (VIM), Cantabro Loss, dan Asphalt Flow Down [14, 15]. Setelah KAO diperoleh, campuran aspal porus dimodifikasi dengan variasi kadar Gilsonite sebesar 0%, 1%, 2%, dan 3% terhadap berat aspal optimum. Proses modifikasi Gilsonite dilakukan dengan wet process, yaitu Gilsonite terlebih dahulu dicampurkan ke dalam aspal Pen 60/70 panas sebelum binder termodifikasi tersebut dicampurkan dengan agregat. Aspal dipanaskan pada temperatur pencampuran sekitar 155-160 °C, kemudian Gilsonite dimasukkan secara bertahap sambil diaduk hingga campuran binder tampak homogen. Pemilihan wet process dilakukan untuk meningkatkan peluang dispersi Gilsonite di dalam binder, mengurangi segregasi aditif, dan menghasilkan lapisan binder yang lebih seragam pada permukaan agregat. Setelah binder termodifikasi terbentuk, agregat yang telah dipanaskan dicampurkan hingga seluruh permukaan agregat terselimuti aspal secara merata. Setiap variasi campuran dibuat dalam jumlah spesimen yang memadai untuk setiap jenis pengujian agar diperoleh hasil yang representatif [4, 16, 17].

3.3 Pengujian *Cantabro Loss*

Ketahanan campuran terhadap raveling dievaluasi menggunakan uji *Cantabro* dengan mesin *Los Angeles* tanpa bola baja. Pengujian ini bertujuan mengukur kehilangan berat akibat abrasi yang merepresentasikan potensi pelepasan agregat pada kondisi lalu lintas.

Persentase kehilangan berat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$A = L = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100 \quad (1)$$

di mana L adalah kehilangan berat (%), M_o berat benda uji sebelum abrasi (g), dan M_i berat setelah abrasi (g). Nilai kehilangan berat yang lebih kecil menunjukkan ketahanan campuran yang lebih baik terhadap raveling [18, 19].

3.4 Pengujian *Asphalt Flow Down*

Uji *asphalt flow down* dilakukan untuk mengevaluasi potensi terjadinya *drain-down* pada temperatur tinggi, yaitu pemisahan aspal dari agregat selama proses pencampuran atau penghamparan. Pengujian mengacu pada AASHTO T 305.

Nilai AFD dihitung menggunakan:

$$AFD = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \times 100 \% \quad (2)$$

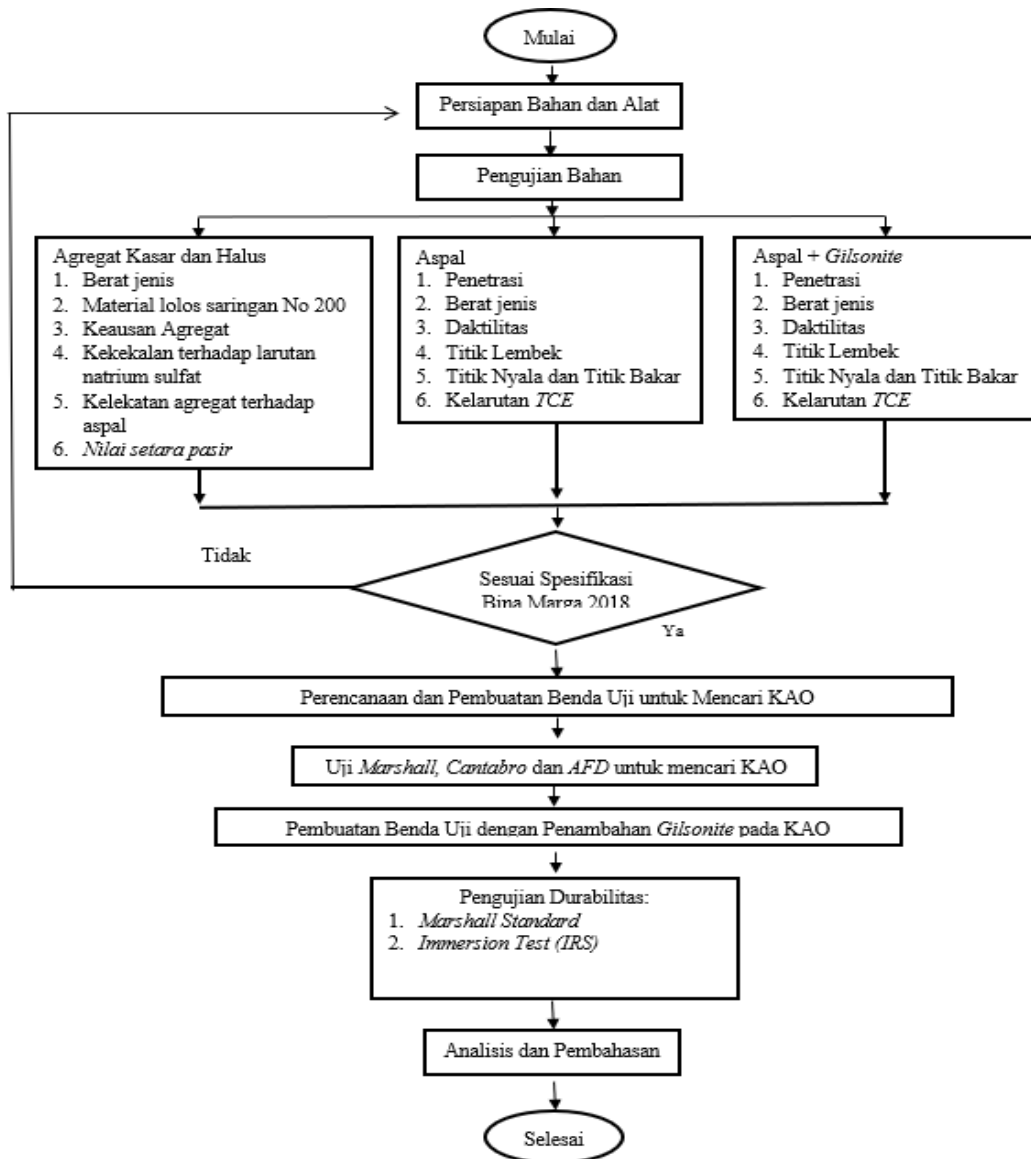
dengan m_1 berat nampan kosong (g), m_2 berat nampan beserta campuran sebelum pemanasan (g), dan m_3 berat nampan beserta campuran setelah pemanasan (g). Nilai AFD yang rendah menunjukkan kestabilan campuran terhadap pemisahan aspal [20, 21].

3.5 Pengujian *Marshall Standard* dan *Immersion Test*

Karakteristik mekanis campuran dievaluasi menggunakan uji *Marshall Standard* dan *Immersion Test* sesuai RSNI M-01-2003 dan SNI 6753:2015. Uji *Marshall* menghasilkan parameter stabilitas dan flow, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung *Marshall Quotient (MQ)* sebagai indikator kekakuan campuran. *Immersion Test* dilakukan dengan perendaman benda uji dalam waterbath selama periode tertentu untuk menentukan indeks kekuatan sisa (IRS), yang merepresentasikan ketahanan campuran terhadap pengaruh air. Perbandingan nilai stabilitas sebelum dan sesudah perendaman digunakan untuk menilai sensitivitas campuran terhadap kelembapan serta efektivitas Gilsonite dalam meningkatkan durabilitas aspal porus [22, 23].

3.6 Data Analysis

Analisis dilakukan dengan membandingkan seluruh parameter kinerja antar variasi kadar *Gilsonite*. Evaluasi tidak hanya didasarkan pada satu indikator, tetapi pada pendekatan multi-parameter yang meliputi stabilitas, *flow*, *MQ*, *VIM*, *Cantabro Loss*, *AFD*, dan *IRS*. Kadar *Gilsonite* optimum ditentukan berdasarkan kombinasi performa terbaik yang memenuhi spesifikasi teknis serta menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap deformasi dan kerusakan akibat air tanpa mengurangi fungsi drainase campuran aspal porus.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Karakteristik Bahan dan Kadar Aspal Optimum

Berdasarkan Tabel 1, seluruh parameter agregat memenuhi spesifikasi. Berat jenis agregat kasar (2,65) dan halus (2,62) lebih besar dari syarat ($\geq 2,5$), sedangkan material lolos saringan No. 200 masih rendah, yaitu 0,73% (kasar) dan 7,17% (halus) ($< 10\%$). Agregat kasar juga menunjukkan ketahanan yang baik dengan nilai *Los Angeles* 23,82% ($< 40\%$) dan kekekalan natrium sulfat 5,61% ($< 12\%$), serta memiliki kelekatan terhadap aspal 98% ($\geq 95\%$). Agregat halus tergolong bersih dengan nilai setara pasir 90,61% ($\geq 50\%$). Secara keseluruhan, agregat layak digunakan untuk campuran aspal porus.

Tabel 1. Hasil pengujian agregat

Jenis Pengujian	Spek.	Kasar	Halus
Berat Jenis	$\geq 2,5$	2,65	2,62
Material Lolos Saringan No. 200 (%)	≤ 10	0,73	7,17
Keausan Agregat dengan Mesin <i>Los Angeles</i> (%)	≤ 40	23,82	-
Kekekalan terhadap larutan Natrium Sulfat (%)	≤ 12	5,61	-
Kelekatan Agregat Terhadap Aspal (%)	≥ 95	98	-
Nilai Setara Pasir (%)	≥ 50	-	90,61

Sumber: Hasil pengujian laboratorium berdasarkan Spesifikasi Bina Marga (2018).

Berdasarkan Tabel 2, aspal Pen 60/70 memenuhi spesifikasi: berat jenis 1,040 ($\geq 1,0$), penetrasi 63,1 (60–70), daktilitas 164 cm (≥ 100), titik nyala 285°C dan titik bakar 295°C ($\geq 232^\circ\text{C}$), kelarutan TCE 99,20% (≥ 99), serta titik lembek 49°C (≥ 48). Setelah dimodifikasi *Gilsonite*, sifat aspal cenderung menjadi lebih tahan panas, ditunjukkan oleh kenaikan titik nyala menjadi 310°C, titik bakar 320°C, dan titik lembek 51°C, sementara penetrasi turun menjadi 60,2 dan daktilitas tetap tinggi (167,5 cm). Berat jenis aspal modifikasi 1,022 masih berada dalam rentang spesifikasi (0,92–1,06) dan kelarutan TCE 99,012% tetap memenuhi.

Tabel 2. Hasil pengujian aspal

Parameter	Aspal Pen 60/70		Aspal Modifikasi <i>Gilsonite</i>	
	Spek.	Hasil	Spek.	Hasil
Berat Jenis	$\geq 1,0$	1,040	0,92 - 1,06	1,022
Penetrasi (0,1 mm)	60 - 70	63,1	-	60,2
Daktilitas (cm)	≥ 100	164	-	167,5
Titik Nyala (°C)	≥ 232	285	≥ 180	310
Titik Bakar (°C)	≥ 232	295	-	320
Kelarutan TCE (%)	≥ 99	99,20	-	99,012
Titik Lembek (°C)	≥ 48	49	-	51

Sumber: Hasil pengujian laboratorium berdasarkan Spesifikasi Bina Marga (2018).

Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai *Asphalt Flow Down (AFD)* meningkat seiring kenaikan kadar aspal. Pada kadar aspal 5% dan 5,5%, nilai *AFD* masing-masing 0,110% dan 0,230%, sehingga masih memenuhi batas maksimum 0,3%. Mulai kadar aspal 6% nilai *AFD* naik menjadi 0,631% dan terus meningkat pada 6,5% (1,243%) serta 7% (1,396%), sehingga tidak memenuhi persyaratan. Dengan demikian, kadar aspal maksimum yang masih aman berdasarkan kriteria *AFD* berada pada 5,5%.

Tabel 3. Hasil pengujian *asphalt flow down* untuk menentukan KAO

Kadar Aspal (%)	Nilai <i>AFD</i> (%)	<i>Max AFD</i>
5	0,110	0,3
5,5	0,230	0,3
6	0,631	0,3
6,5	1,243	0,3
7	1,396	0,3

Sumber: Hasil pengujian laboratorium mengacu kriteria *AFD* maksimum 0,3%.

Tabel 4 menunjukkan bahwa kenaikan kadar aspal dari 5% hingga 6% meningkatkan stabilitas (514,775 → 580,467 kg), namun pada kadar 6,5–7% stabilitas kembali menurun. Nilai *flow* cenderung naik seiring bertambahnya kadar aspal (3,6 → 4,4 mm), sedangkan *density* meningkat (2,0004 → 2,0535 g/cc). Parameter rongga menunjukkan tren yang konsisten, yaitu *VIM* menurun (18,71% → 14,16%) dan *VFWA* meningkat (33,95% → 49,46%), yang menandakan rongga campuran semakin terisi aspal.

Berdasarkan batas spesifikasi (stabilitas >500 kg; flow 2–6 mm; *VIM* 18–25%), kadar aspal yang masih memenuhi semua kriteria utama adalah 5% dan 5,5%. Pada 6% ke atas, nilai *VIM* < 18% sehingga tidak memenuhi syarat campuran aspal porus. Secara performa, 5,5% memberikan kombinasi yang lebih baik karena stabilitas dan *MQ* lebih tinggi dibanding 5% dengan *VIM* yang masih berada dalam rentang spesifikasi.

Tabel 4. Hasil pengujian karakteristik *marshall* untuk menentukan KAO

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	<i>MQ</i> (kg/mm)	<i>VIM</i> (%)	<i>VFWA</i> (%)	<i>VMA</i> (%)	<i>Density</i> (gr/cc)
5	514,775	3,6	143,34	18,71	33,95	28,33	2,0004
5.5	556,299	3,7	150,48	18,28	36,90	28,70	2,0007
6	580,467	3,9	149,77	16,53	41,43	28,21	2,0250
6.5	524,636	4,3	121,98	15,37	45,83	28,11	2,0387
7	504,894	4,4	114,36	14,16	49,46	27,98	2,0535
Spesifikasi	> 500	2 – 6	< 400	18 – 25			

Sumber: Hasil pengujian laboratorium dan spesifikasi campuran aspal porus yang dirujuk.

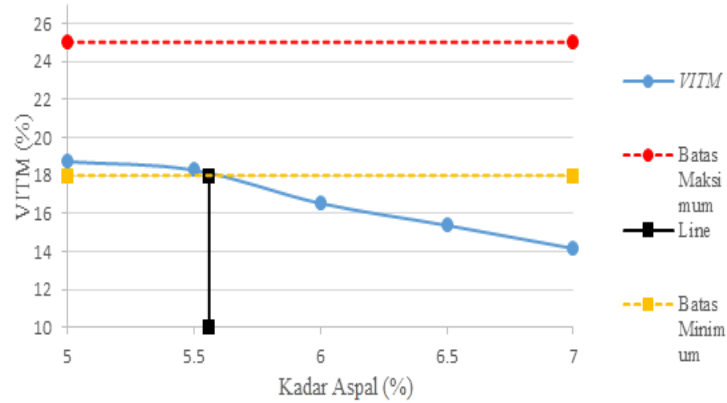
Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai *Cantabro Loss* menurun seiring meningkatnya kadar aspal, dari 39,05% (5%) menjadi 14,87% (7%), yang mengindikasikan ketahanan terhadap raveling semakin baik ketika kadar aspal bertambah. Berdasarkan batas spesifikasi maksimum 35%, campuran dengan kadar aspal 5% tidak memenuhi, sedangkan kadar aspal 5,5% hingga 7% memenuhi karena *Cantabro Loss* berada di bawah 35%.

Tabel 5. Hasil pengujian *cantabro loss* untuk menentukan KAO

Kadar Aspal (%)	<i>Cantabro Loss</i> (%)	Spesifikasi Maks
5	39,05	35
5,5	29,98	35
6	23,20	35
6,5	20,27	35
7	14,87	35

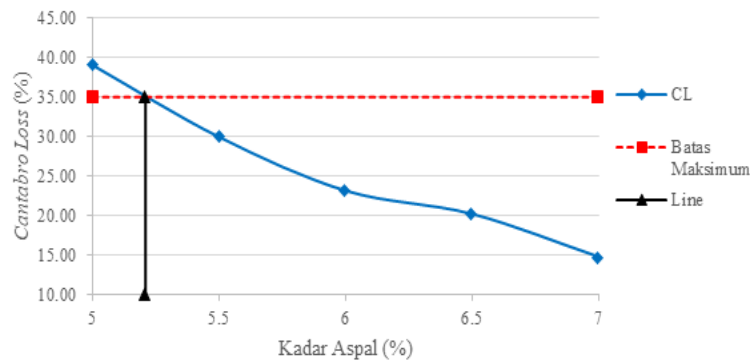
Sumber: Hasil pengujian laboratorium dan batas *Cantabro Loss* maksimum yang dirujuk.

Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai *VIM* menurun seiring meningkatnya kadar aspal. Pada kadar aspal 5%–5,5%, *VIM* masih berada pada kisaran ±18% sehingga masih memenuhi batas minimum (≈18%). Namun, ketika kadar aspal dinaikkan menjadi 6%–7%, nilai *VIM* turun hingga <18%, yang menandakan rongga campuran semakin terisi aspal dan tidak lagi memenuhi persyaratan aspal porus. Dengan demikian, grafik ini menegaskan bahwa kadar aspal sekitar 5,5% merupakan batas optimum yang masih menjaga rongga udara sesuai spesifikasi.



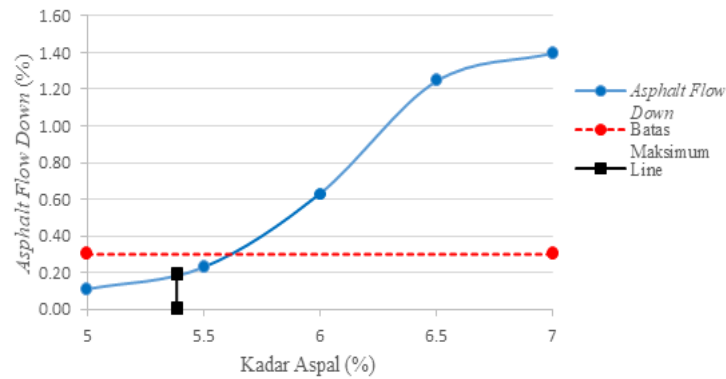
Gambar 2. Pengaruh kadar aspal terhadap nilai VIM

Gambar 3 memperlihatkan bahwa nilai *Cantabro Loss* menurun tajam ketika kadar aspal meningkat, yang menunjukkan campuran semakin tahan raveling/keausan karena ikatan aspal-agregat makin kuat. Pada kadar aspal 5%, *Cantabro Loss* masih berada di atas batas maksimum 35%, sehingga campuran belum memenuhi persyaratan. Kurva kemudian memotong garis batas pada sekitar 5,2–5,3%, yang menandakan mulai kadar tersebut campuran sudah memenuhi spesifikasi. Setelah melewati titik itu, penurunan *Cantabro Loss* terus berlanjut hingga kadar aspal 7%, sehingga secara ketahanan abrasi, kadar aspal yang lebih tinggi memberikan performa yang lebih baik.



Gambar 3. Hubungan antara kadar aspal dengan nilai *Cantabro Loss*

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai Asphalt Flow Down (AFD) meningkat seiring kenaikan kadar aspal. Garis batas standar pada grafik ditetapkan sebesar 0,3% sebagai nilai maksimum AFD yang masih dapat diterima untuk mengendalikan drain-down pada campuran bergradasi terbuka. Pada kadar aspal 5% dan 5,5%, nilai AFD masih berada di bawah batas tersebut, yaitu masing-masing 0,110% dan 0,230%, sehingga campuran masih stabil dan tidak terjadi pemisahan aspal yang signifikan. Namun, mulai kadar aspal 6%, nilai AFD melewati batas 0,3% dan meningkat tajam hingga 1,396% pada kadar aspal 7%. Kondisi tersebut mengindikasikan pengaliran binder yang berlebihan dan berpotensi mengganggu homogenitas campuran. Dengan demikian, berdasarkan kriteria AFD, kadar aspal maksimum yang masih aman berada di sekitar 5,5%.



Gambar 4. Grafik nilai Asphalt Flow Down pada berbagai kadar aspal dengan batas maksimum 0,3%

Tabel 6 merangkum penentuan kadar aspal optimum (KAO) berdasarkan kombinasi beberapa kriteria. Batas *VIM* minimum menghasilkan kadar aspal 5,56%, sedangkan batas *Cantabro Loss* maksimum memberikan nilai 5,21%. Nilai tengah dari kedua kriteria tersebut menghasilkan rata-rata 5,39%. Selanjutnya, nilai rata-rata tersebut dikaitkan dengan grafik *Asphalt Flow Down* dan diperoleh nilai *AFD* sekitar 0,19%, yang masih berada di bawah batas maksimum. Berdasarkan rangkaian evaluasi tersebut, KAO ditetapkan sebesar 5,58% sebagai kadar aspal yang memenuhi persyaratan rongga, ketahanan raveling, dan stabilitas terhadap drain-down.

Tabel 6. Rekapitulasi hasil kadar aspal optimum

Karakteristik	Satuan (%)
<i>VIM</i> minimum	5,56
<i>Cantabro Loss</i> maksimum	5,21
Rata-rata <i>VIM</i> dan <i>Cantabro Loss</i>	5,39
Nilai Rata-rata <i>VIM</i> min. dengan <i>Cantabro Loss</i> maks. yang di plotting pada Grafik <i>Asphalt Flow Down</i>	0,19
Kadar aspal optimum	5,58

Sumber: Hasil analisis penentuan KAO berdasarkan *VIM*, *Cantabro Loss*, dan *AFD*.

4.2 Karakteristik Marshall Standard

Tabel 7 memperlihatkan bahwa pemakaian Gilsonite meningkatkan kinerja Marshall campuran aspal porous. Nilai stabilitas naik bertahap dari 556,20 kg pada campuran kontrol menjadi 694,04 kg pada kadar Gilsonite 3%, sehingga terjadi peningkatan sekitar 24,78% dan seluruh variasi melampaui spesifikasi >500 kg. Seiring peningkatan stabilitas, nilai MQ juga meningkat dari 149,03 menjadi 208,24 kg/mm atau sekitar 39,73%, yang menunjukkan campuran menjadi lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa Gilsonite memperkuat kohesi binder dan memperbaiki kontribusi ikatan aspal-agregat pada campuran bergradasi terbuka. Di sisi lain, nilai flow cenderung berkurang dari 3,73 mm menjadi 3,30 mm, tetapi tetap berada dalam rentang spesifikasi 2-6 mm, sehingga campuran tidak menunjukkan indikasi getas berlebihan. Parameter rongga menunjukkan *VIM* (*VITM*) relatif stabil pada kisaran 18,04-18,36% dan masih memenuhi batas 18-25%, sedangkan *VFWA* sedikit meningkat (36,81% menjadi 37,29%) dan *VMA* sedikit menurun (29,05% menjadi 28,78%). Perubahan tersebut menandakan bahwa pengisian rongga oleh binder termodifikasi menjadi lebih efektif tanpa menghilangkan porositas yang diperlukan untuk fungsi drainase. Nilai density meningkat tipis dari 1,993 menjadi 2,000 g/cc, yang menunjukkan pemadatan campuran sedikit lebih baik. Secara keseluruhan, kadar Gilsonite 3% memberikan performa Marshall terbaik karena menghasilkan stabilitas dan MQ tertinggi dengan *VIM* serta flow yang tetap sesuai spesifikasi.

Tabel 7. Hasil pengujian Marshall standard

Kadar <i>Gilsonite</i> (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
0	556,20	3,73	149,03	18,36	36,81	29,05	1,993
1	617,99	3,67	168,87	18,27	36,94	28,97	1,995
2	661,03	3,43	192,57	18,16	37,11	28,88	1,997
3	694,04	3,3	208,24	18,04	37,29	28,78	2,000
Spesifikasi	> 500	2 – 6	< 400	18 – 25	-	-	-

Sumber: Hasil pengujian laboratorium.

4.3 Karakteristik Perendaman *Marshall (Immersion Test)*

Tabel 8 menunjukkan bahwa penambahan *Gilsonite* meningkatkan ketahanan campuran aspal porus terhadap perendaman. Nilai stabilitas setelah perendaman 0,5 jam meningkat dari 556,20 kg (0%) menjadi 694,04 kg (3%), dan setelah perendaman 24 jam juga naik dari 502,39 kg menjadi 630,43 kg. Seluruh nilai stabilitas 24 jam tetap memenuhi spesifikasi >500 kg. Nilai IRS berada pada kisaran 90,33–90,83% dan seluruh variasi memenuhi persyaratan minimum 90%, dengan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kadar *Gilsonite*. Parameter deformasi juga membaik, ditunjukkan oleh IDP yang menurun dari 0,412% menjadi 0,390% dan IDK yang turun dari 4,736% menjadi 4,487%, menandakan campuran lebih stabil dan kurang rentan mengalami penurunan kinerja akibat pengaruh air. Secara keseluruhan, kadar *Gilsonite* 3% memberikan performa immersion terbaik karena menghasilkan stabilitas dan IRS tertinggi serta nilai IDP–IDK terendah.

Tabel 8. Hasil pengujian Immersion Test

Kadar <i>Gilsonite</i> (%)	Stabilitas (kg)		IRS (%)	IDP	IDK
	0,5 jam	24 jam	(%)	(%)	(%)
0	556,20	502,39	90,33	0,412	4,736
1	617,99	560,12	90,64	0,398	4,585
2	661,03	599,38	90,67	0,397	4,566
3	694,04	630,43	90,83	0,390	4,487
Spesifikasi	> 500		Min 90 %		

Sumber: Hasil pengujian laboratorium.

Hasil pengujian material menunjukkan bahwa seluruh bahan penyusun memenuhi persyaratan sehingga layak digunakan pada campuran aspal porus. Agregat kasar dan halus memiliki berat jenis yang memadai, kandungan material lolos saringan No. 200 rendah, serta ketahanan terhadap abrasi (*Los Angeles*) dan pelapukan (Na_2SO_4) berada di bawah batas spesifikasi; di sisi lain, kelekatan agregat terhadap aspal tinggi dan nilai setara pasir agregat halus sangat baik, yang mengindikasikan agregat relatif bersih dari lempung dan berpotensi membentuk ikatan aspal–agregat yang kuat. Aspal Pen 60/70 juga memenuhi parameter dasar, sedangkan modifikasi *Gilsonite* menghasilkan kecenderungan binder lebih stabil pada temperatur tinggi yang ditunjukkan oleh kenaikan titik nyala, titik bakar, dan titik lembek serta penurunan penetrasi, sementara daktilitas tetap tinggi dan kelarutan TCE tetap memenuhi; kombinasi ini mengarah pada peningkatan kekakuan dan stabilitas termal binder yang relevan untuk menekan deformasi permanen pada campuran bergradasi terbuka.

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) memperlihatkan adanya trade-off khas aspal porus antara kebutuhan porositas dan ketahanan campuran. Peningkatan kadar aspal menurunkan *VIM* (grafik *VIM*), yang berarti rongga antar-agregat semakin terisi aspal dan fungsi drainase berpotensi menurun bila kadar aspal terlalu tinggi. Hasil *Marshall* untuk penentuan KAO menunjukkan bahwa stabilitas meningkat hingga kadar aspal 6% lalu menurun pada 6,5–7%, sedangkan flow dan density meningkat; namun kriteria aspal porus dibatasi oleh *VIM* 18–25%, sehingga kadar aspal 6% ke atas tidak memenuhi karena *VIM* turun di bawah 18%. Dari sisi ketahanan raveling, *Cantabro Loss* menurun tajam dengan naiknya kadar aspal dan mulai memenuhi batas maksimum 35% pada sekitar 5,2–5,3% (grafik *Cantabro*), yang menegaskan bahwa penambahan binder meningkatkan kohesi campuran. Sebaliknya, pengujian *Asphalt Flow Down* menunjukkan *AFD* meningkat signifikan saat kadar aspal bertambah; hanya kadar aspal 5–5,5% yang berada di bawah batas 0,3%, sedangkan pada 6% ke atas terjadi *drain-down* yang mengindikasikan pemisahan aspal dan berpotensi mengganggu homogenitas campuran (grafik *AFD*). Dengan mengintegrasikan batas *VIM* minimum, batas *Cantabro* maksimum, dan verifikasi *AFD*, rekapitulasi menghasilkan KAO sekitar 5,58%, yaitu kadar yang masih mempertahankan porositas minimum, telah memenuhi ketahanan raveling, dan tetap aman terhadap *drain-down*.

Pada KAO tersebut, penambahan Gilsonite 0-3% meningkatkan karakteristik Marshall secara konsisten. Stabilitas naik bertahap dari 556,20 kg (0%) menjadi 694,04 kg (3%) dan seluruhnya melampaui spesifikasi >500 kg, sementara MQ meningkat dari 149,03 menjadi 208,24 kg/mm yang menunjukkan peningkatan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi. Flow menurun, tetapi tetap berada pada rentang 2-6 mm sehingga campuran tidak menjadi terlalu getas. Parameter volumetrik relatif terjaga karena *VIM* berada pada kisaran 18,04-18,36% dan tetap memenuhi batas 18-25%, sedangkan perubahan *VFWA* dan *VMA* kecil serta density meningkat tipis. Kondisi ini menandakan bahwa penambahan Gilsonite memperkuat binder dan membantu penyelimutan agregat tanpa menutup rongga utama yang dibutuhkan untuk fungsi drainase. Kinerja terhadap pengaruh air juga membaik, ditunjukkan oleh meningkatnya stabilitas setelah perendaman 24 jam dari 502,39 kg (0%) menjadi 630,43 kg (3%) serta *IRS* yang berada pada 90,33-90,83% dan seluruhnya memenuhi minimum 90%. Penurunan *IDP* dan *IDK* seiring penambahan Gilsonite menunjukkan bahwa degradasi kinerja akibat perendaman semakin kecil. Secara teknis, efektivitas kadar 3% dapat dijelaskan oleh pembentukan binder yang lebih kaku, kohesif, dan stabil terhadap air. Binder termodifikasi tersebut memperkuat film aspal pada permukaan agregat, menghambat pelemahan ikatan akibat air, serta meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi dan raveling tanpa menurunkan *VIM* di bawah batas spesifikasi aspal porus.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan rangkaian hasil benda uji, dimensi batu dan aspal Pen 60/70 yang digunakan memenuhi persyaratan teknis serta layak sebagai material penyusun campuran aspal porus. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) menunjukkan adanya kompromi antara kebutuhan porositas dan ketahanan campuran: kenaikan kadar aspal memang menurunkan *Cantabro Loss* (ketahanan raveling meningkat), tetapi secara simultan menurunkan *VIM* dan menaikkan *Asphalt Flow Down (AFD)* hingga berpotensi mengurangi fungsi drainase serta memicu *drain-down*. Integrasi kriteria *VIM* minimum, *Cantabro Loss* maksimum, dan batas *AFD* menghasilkan KAO sebesar 5,58%, yang memberikan kombinasi terbaik antara stabilitas rongga, ketahanan abrasi, dan kestabilan campuran terhadap pemisahan binder.

Pada KAO tersebut, penambahan Gilsonite 0-3% terbukti efektif meningkatkan kinerja Marshall dan durabilitas terhadap pengaruh air tanpa mengorbankan karakteristik pori. Stabilitas dan Marshall Quotient meningkat konsisten seiring kenaikan kadar Gilsonite, sementara flow tetap berada dalam rentang yang dipersyaratkan. Parameter volumetrik, terutama *VIM*, tetap berada pada kisaran spesifikasi aspal porus, sehingga fungsi drainase tetap terjaga. Hasil Immersion Test memperlihatkan stabilitas pascaperendaman dan nilai *IRS* yang memenuhi spesifikasi minimum, disertai penurunan indikator degradasi (*IDP* dan *IDK*). Efektivitas Gilsonite 3% dapat dijustifikasi melalui kombinasi peningkatan stabilitas sebesar sekitar 24,78%, peningkatan MQ sebesar sekitar 39,73%, stabilitas 24 jam tertinggi sebesar 630,43 kg, *IRS* tertinggi sebesar 90,83%, serta nilai *IDP* dan *IDK* terendah. Secara keseluruhan, kadar Gilsonite 3% merupakan formulasi paling prospektif karena menghasilkan performa tertinggi pada stabilitas, kekakuan campuran, dan ketahanan perendaman dengan tetap mempertahankan porositas sesuai spesifikasi. Perlu dilakukan uji coba penggunaan campuran aspal porus dengan aditif *Gilsonite* ini pada ruas jalan di Indonesia, khususnya di wilayah yang memiliki curah hujan yang tinggi sebagai lapisan atas (*surface*), karena memiliki sifat fungsional (non struktural) yaitu untuk mengalirkan air melalui rongga-rongga sebagai sistem drainase serta didukung dengan struktur yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yoga Setyawan and M. Pamadi, "Structural and Functional Evaluation of Road Pavement on Jalan Raya Ligung, Majalengka," *Lead. Civ. Eng. Archit. J.*, vol. 2, no. 4, pp. 899–910, Aug. 2024, doi: 10.37253/leader.v2i4.10144.
- [2] M. A. Alsheyab, M. A. Khasawneh, A. Abualia, and A. Sawalha, "A critical review of fatigue cracking in asphalt concrete pavement: a challenge to pavement durability," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 9, no. 10, p. 386, Oct. 2024, doi: 10.1007/s41062-024-01704-1.
- [3] N. Darshan and A. V. Kataware, "Review on Porous Asphalt Pavements: A Comprehensive Resolution for Stormwater Management and Applications in Current Built Environment," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–25, Jan. 2026, doi: 10.1007/s42947-024-00444-w.
- [4] S. Sobhi, A. Yousefi, and A. Behnood, "The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117676, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117676.
- [5] K. A. Ahmad, M. E. Abdullah, N. Abdul Hassan, H. A. Daura, and K. Ambak, "A review of using porous asphalt pavement as an alternative to conventional pavement in stormwater treatment," *World J. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 355–362, Oct. 2017, doi: 10.1108/WJE-09-2016-0071.
- [6] B. Jansen van Vuuren, M. van Dijk, and W. J. vdM Steyn, "The interception capabilities of slotted drains as pavement surface drainage systems," *J. South African Inst. Civ. Eng.*, vol. 62, no. 4, pp. 11–19, Dec. 2020, doi: 10.17159/2309-8775/2020/v62n4a2.
- [7] C.-Y. Zhuang, Y. Hao, Y.-L. Ye, and J.-K. Guo, "Research on strength formation mechanism and noise reduction characteristics of waste rubber powder micro-surfacing," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, p. e02293, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02293.
- [8] Y. Wang and W. Ji, "Performance optimization and mechanism study of asphalt mixtures modified with ZM additive," *PLoS One*, vol. 20, no. 12, p. e0337535, Dec. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0337535.
- [9] W. Wang, L. Wang, H. Xiong, and R. Luo, "A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 204, pp. 631–642, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.167.
- [10] H. R. Jahanian, G. Shafabakhsh, and H. Divandari, "Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 156–164, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.069.
- [11] A. Amini and M. Akrami, "Improving the performance and rheological properties of RAP binders using gilsonite/nanoclay and softer binder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 400, p. 132797, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132797.
- [12] B. Zhang, J. Liu, Q. Le, and Z. Lu, "Rheological Deterioration of High Viscosity High Elasticity Asphalt (HVEA) Under the Coupling Effect UV Aging and Salt Freeze-Thaw (SFT) Cycles," *Coatings*, vol. 15, no. 11, p. 1311, Nov. 2025, doi: 10.3390/coatings15111311.
- [13] H. Al Hawesah et al., "A Review on Improving Asphalt Pavement Service Life Using Gilsonite-Modified Bitumen," *Sustainability*, vol. 13, no. 12, p. 6634, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13126634.
- [14] M. J. Chen and Y. D. Wong, "Gradation design of porous asphalt mixture (PAM) for low-strength application in wet environment," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 19, no. 7, pp. 611–622, Jul. 2018, doi: 10.1080/10298436.2016.1199873.
- [15] S. N. Suresha, G. Varghese, and A. U. R. Shankar, "Characterization of porous friction course mixes for different Marshall compaction efforts," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2887–2893, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.008.
- [16] S. Ghazi, R. Marefat Seyedlar, N. Naderpour, and M. Imani, "A thermogravimetric analysis of residual char formation by gilsonite-filled, polyfurfuryl alcohol composites: acid treatment of gilsonite," *Discov. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 1, p. 15, Jun. 2024, doi: 10.1007/s43938-024-00054-9.
- [17] A. Amini and N. Soltanian, "Sustainable asphalt solutions: Leveraging NaClO-ARP and modifiers for improved binder properties and environmental benefits," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 23, p. e05396, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05396.
- [18] H. Bach and C. Latal, "Attrition Kinetics of the Los-Angeles-Test," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 41, no. 2, pp. 597–609, Mar. 2023, doi: 10.1007/s10706-022-02271-x.
- [19] W. Ren, S. Han, J. Li, and M. Liu, "Investigation of the relative abrasion resistance of concrete pavement with chip-sprinkled surfaces," *Wear*, vol. 382–383, pp. 95–101, Jul. 2017, doi:

- 10.1016/j.wear.2017.04.011.
- [20] L. Devulapalli, G. Sarang, and S. Kothandaraman, “Characteristics of aggregate gradation, drain down and stabilizing agents in stone matrix asphalt mixtures: A state of art review,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 9, no. 2, pp. 167–179, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jtte.2021.10.007.
- [21] Y. M. Jebur et al., “Production of an Eco-friendly Stone Matrix Asphalt Mixture Using Recycled Additives,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 1363–1379, Nov. 2025, doi: 10.1007/s42947-024-00419-x.
- [22] A. Khan et al., “An ensemble tree-based prediction of Marshall mix design parameters and resilient modulus in stabilized base materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 401, p. 132833, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132833.
- [23] M. A. Gul et al., “Prediction of Marshall Stability and Marshall Flow of Asphalt Pavements Using Supervised Machine Learning Algorithms,” *Symmetry (Basel)*, vol. 14, no. 11, p. 2324, Nov. 2022, doi: 10.3390/sym14112324.
- [24] D. A. Zuluaga-Astudillo, D. Rondón-Quintana, and F. A. Reyes-Lizcano, “Mechanical Performance of Gilsonite Modified Asphalt Mixture Containing Recycled Concrete Aggregate,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, p. 4409, May 2021, doi: 10.3390/app11104409.