

Evaluasi Modulus Resilien dan Perilaku Fatigue Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Menggunakan Aspal Modifikasi Asbuton Murni Lawele

**Khodijah Al Qubro*¹, Murtaza Haider Syed², Ghina Amalia³, Iva Nazila⁴, Sri Hendarto⁵,
Rio Ramadhan⁶, Miftahul Jannah Lubis⁷**

Universitas Indo Global Mandiri, Palembang, Indonesia ^{1,3,4,6,7}
Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah, Kuantan, Malaysia²
Institusi Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia⁵

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Asbuton Lawele, Stone Matrix Asphalt, modulus resilien, ketahanan kelelahan.

***Correspondence email:**

khodijah@uigm.ac.id

Submitted: 14 Januari 2026

Revised: 21 Januari 2026

Accepted: 25 Januari 2026

Published: 04 Februari 2026

ABSTRAK

Asbuton murni jenis Lawele merupakan aspal alam lokal dengan kadar bitumen tinggi yang berpotensi sebagai bahan pengikat alternatif berkelanjutan untuk perkerasan jalan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja mekanistik campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) menggunakan asbuton Lawele melalui pengujian modulus resilien dan ketahanan kelelahan. Campuran SMA berbahan asbuton Lawele dibandingkan dengan campuran menggunakan aspal Pen 60/70 dan aspal modifikasi polimer Starbit E-55, pengujian dilakukan pada kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO) yang ditentukan menggunakan metode Marshall. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran SMA dengan aspal modifikasi memiliki kinerja mekanistik lebih baik dibandingkan aspal Pen 60/70. Campuran PMA 2% menghasilkan nilai modulus resilien sebesar 578 MPa pada suhu 35°C dan 198 MPa pada 45°C, serta umur kelelahan sebesar 242.660 siklus pada regangan $\pm 400 \mu\epsilon$, yang lebih tinggi dibandingkan aspal Pen 60/70. Temuan ini menunjukkan bahwa Asbuton Lawele murni (PMA 2%) berpotensi sebagai bahan pengikat lokal alternatif yang mampu meningkatkan kinerja struktural dan ketahanan kelelahan campuran SMA.

ABSTRACT

Keywords:

Asbuton Lawele, Stone Matrix Asphalt, modulus of elasticity, fatigue resistance.

Pure Lawele Asbuton is a local natural asphalt with a high bitumen content and significant potential as a sustainable alternative binder for road pavement applications. This study aims to evaluate the mechanistic performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures incorporating Lawele Asbuton through resilient modulus and fatigue resistance testing. SMA mixtures containing Lawele Asbuton were compared with mixtures using conventional Pen 60/70 asphalt and polymer-modified asphalt Starbit E-55. All tests were conducted at the Optimum Asphalt Content (OAC) determined using the Marshall method. The results indicate that SMA mixtures with modified binders exhibit superior mechanistic performance compared to Pen 60/70 asphalt. The PMA 2% mixture achieved resilient modulus values of 578 MPa at 35°C and 198 MPa at 45°C, along with a fatigue life of 242,660 cycles at a strain level of $\pm 400 \mu\epsilon$, which is significantly higher than that of the Pen 60/70 mixture. These findings demonstrate that pure Lawele Asbuton (PMA 2%) has strong potential as a local alternative binder capable of enhancing the structural performance and fatigue resistance of SMA mixtures.

PENDAHULUAN

Kebutuhan aspal untuk kegiatan pembangunan dan pemeliharaan jalan di Indonesia mencapai sekitar 1,2 juta ton per tahun, sedangkan kemampuan produksi aspal minyak dalam negeri baru memenuhi sekitar 650.000 ton per tahun. Hal ini menyebabkan kurangnya pasokan aspal sebesar ± 550.000 ton per tahun sehingga masih bergantung pada impor (Arham et al., 2024). Kondisi tersebut menunjukkan tingginya ketergantungan Indonesia terhadap aspal impor, yang berdampak pada aspek ekonomi nasional serta keberlanjutan pembangunan infrastruktur jalan. Secara global, industri perkerasan jalan terus mengembangkan dan mengeksplorasi material yang inovatif dan berkelanjutan untuk meningkatkan kinerja perkerasan, daya tahan, serta efisiensi biaya siklus hidup jalan. Upaya ini didorong oleh meningkatnya volume dan beban lalu lintas, serta keterbatasan sumber daya alam, khususnya minyak bumi sebagai bahan baku utama aspal konvensional (Autelitano et al., 2022), (Salehi et al., 2021), (Nugraha et al., 2025). Selain itu, penurunan cadangan minyak mentah yang berkelanjutan, disertai dengan kebutuhan mendesak untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, semakin menegaskan urgensi pengembangan dan pemanfaatan material alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Ma et al., 2021)

Pendekatan pengembangan material berbasis kinerja (*performance-based materials*) telah banyak diterapkan pada berbagai bidang rekayasa material, termasuk material berbasis biopolimer. Penelitian terdahulu menunjukkan

bahwa metode fabrikasi, komposisi material, serta struktur mikro berperan penting dalam menentukan respons mekanik, ketahanan degradasi, dan perilaku fungsional material terhadap kondisi lingkungan dan pembebanan (Syed et al., 2023, 2024). Konsep ini relevan dengan pengembangan material perkerasan jalan, di mana modifikasi material pengikat dan struktur internal campuran beraspal secara langsung memengaruhi kinerja mekanistik dan umur layan perkerasan. Di Indonesia, aspal penetrasi 60/70 masih merupakan bahan pengikat yang paling umum digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan. Namun, seiring dengan meningkatnya tuntutan kinerja perkerasan, berbagai jenis aspal modifikasi mulai banyak dikaji dan diterapkan. Salah satunya adalah aspal modifikasi Starbit E-55, yang dilaporkan memiliki titik lembek dan ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan aspal penetrasi 60/70 konvensional. (Qubro et al., 2025). Di samping penggunaan aspal modifikasi pabrikan, pemanfaatan aspal alam lokal merupakan alternatif strategis dalam upaya meningkatkan kinerja campuran beraspal sekaligus menekan ketergantungan terhadap aspal impor. Salah satu sumber daya lokal yang memiliki potensi signifikan untuk dikembangkan sebagai bahan pengikat adalah Aspal Buton (Asbuton) (Chasanah & Putra, 2019)

Asbuton merupakan aspal alam yang berasal dari Pulau Buton, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia, dan tersusun atas dua komponen utama, yaitu bitumen alam dan material mineral (Nugraha et al., 2025). Berdasarkan data Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), total Cadangan Asbuton nasional diperkirakan mencapai sekitar 694 juta ton, sehingga menjadikannya sebagai deposit aspal alam terbesar di dunia. Selain memiliki cadangan yang sangat besar, Asbuton juga menunjukkan tingkat kemurnian bitumen yang tinggi, khususnya pada jenis Asbuton Lawele dengan kadar bitumen mencapai 99,25% (Arham et al., 2024).

Seiring meningkatnya volume dan beban lalu lintas serta tuntutan kinerja perkerasan, diperlukan pengembangan jenis campuran beraspal yang mampu memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen dan kerusakan struktural akibat pembebanan berulang (Febrianto et al., 2024). Salah satu jenis campuran beraspal yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah Stone Matrix Asphalt (SMA).

SMA merupakan campuran beraspal berkinerja tinggi yang menggunakan gradasi agregat celah (*gap-graded*), sehingga membentuk kerangka agregat kasar yang saling mengunci. Struktur ini memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap deformasi permanen (*rutting*), durabilitas yang tinggi, serta kinerja yang optimal pada kondisi lalu lintas berat (Khani et al., 2025), (Himawan, 2019). Selain itu juga ketahanan terhadap deformasi permanen, ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) merupakan salah satu indikator utama dalam menilai kinerja campuran beraspal. Fenomena kelelahan terjadi akibat akumulasi kerusakan yang ditimbulkan oleh pembebanan berulang pada tingkat tegangan atau regangan yang masih berada di bawah kapasitas kekuatan material. Dengan demikian, evaluasi ketahanan kelelahan pada campuran SMA menjadi sangat penting untuk memastikan kinerja dan umur layan perkerasan jalan, terutama pada ruas dengan lalu lintas berat (Suaryana et al., 2018).

Dalam perencanaan dan desain struktur perkerasan jalan, evaluasi kinerja campuran beraspal tidak hanya didasarkan pada ketahanan terhadap deformasi permanen dan kelelahan, tetapi juga pada parameter mekanistik yang merepresentasikan respons material terhadap pembebanan lalu lintas. Salah satu parameter mekanistik yang sangat penting adalah modulus elastisitas, yang digunakan dalam penentuan koefisien perkerasan dan secara langsung memengaruhi kinerja serta umur layan perkerasan aspal (Do et al., 2025).

Modulus resiliensi (*resilient modulus*) merupakan salah satu parameter mekanistik yang merepresentasikan modulus elastisitas campuran beraspal berdasarkan deformasi balik akibat pembebanan berulang. Nilai parameter ini dipengaruhi oleh berbagai faktor material dan kondisi pengujian, termasuk jenis aspal, gradasi agregat, suhu, serta durasi pembebanan. Parameter ini menggambarkan kemampuan campuran beraspal dalam mengalami deformasi elastis balik setelah dikenai pembebanan berulang, sehingga memiliki peran penting dalam perencanaan struktur perkerasan dan estimasi umur layan perkerasan jalan (Widianto et al., 2025). Secara umum, peningkatan suhu akan menurunkan nilai modulus resiliensi, yang mengindikasikan berkurangnya kekakuan dan kemampuan campuran beraspal dalam menahan beban lalu lintas (Lestari et al., 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh (Suaryana et al., 2018) menunjukkan bahwa penggunaan bitumen hasil ekstraksi penuh Asbuton dalam campuran beraspal mampu meningkatkan nilai modulus resilien, khususnya pada temperatur rendah hingga menengah. Selanjutnya penelitian yang dilakukan (Hariyadi, 2022) yaitu pengujian modulus resilien dan umur fatigue pada campuran SMA dengan variasi sudut pemadatan menggunakan *Superpave Gyratory Compactor* dan metode Marshall menunjukkan bahwa variasi sudut putaran memengaruhi nilai resilient modulus dan umur fatigue, dengan metode SGC memberikan performa lebih baik dibandingkan Marshall. Selain itu, (Adiwidodo, 2023) menemukan bahwa campuran dengan asbuton murni dan BNA Blend memiliki nilai modulus resilien yang lebih tinggi dibandingkan Pen 60/70, serta menunjukkan variasi ketahanan fatigue antar variasi campuran.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan tujuan dari penelitian ini untuk mengevaluasi kinerja mekanistik campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) beraspal termodifikasi melalui pengujian modulus resilien dan ketahanan fatigue, guna menilai pengaruh modifikasi aspal terhadap respons elastik dan ketahanan retak campuran. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam pengembangan material perkerasan jalan

berbasis sumber daya lokal. Secara ilmiah, penelitian ini memperkaya kajian kinerja mekanistik campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) dengan bahan pengikat Asbuton Lawele murni melalui evaluasi parameter modulus resilien dan ketahanan kelelahan, yang masih terbatas dalam literatur, khususnya pada kondisi temperatur tinggi yang merepresentasikan iklim tropis. Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan dasar teknis dalam pemanfaatan Asbuton Lawele sebagai bahan pengikat alternatif yang berkelanjutan, sehingga dapat menjadi rujukan bagi perencana dan praktisi dalam pemilihan material perkerasan jalan. Selain itu, penelitian ini mendukung upaya pengurangan ketergantungan terhadap aspal impor serta mendorong optimalisasi pemanfaatan sumber daya alam lokal untuk meningkatkan kinerja struktural dan umur layan perkerasan jalan.

METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan pengumpulan data primer yang diperoleh melalui serangkaian pengujian terhadap material aspal dan campuran beraspal *Stone Matrix Asphalt* (SMA) berbahan Asbuton. Campuran beraspal yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Aspal Minyak Pertamina Pen 60/70 yang dimodifikasi dengan penambahan Asbuton murni sebagai bahan aditif. Sebagai pembanding, digunakan aspal modifikasi polimer Starbit E-55 untuk mengevaluasi perbedaan kinerja campuran. Seluruh tahapan pengujian dan evaluasi dilakukan dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) serta standar internasional yang relevan, antara lain AASHTO, ASTM, Asphalt Institute, dan British Standard (BS), guna menjamin keandalan dan keterbandingan hasil pengujian.

Agregat yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah Sewo, Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Untuk memastikan kesesuaian agregat terhadap persyaratan spesifikasi teknis campuran SMA, dilakukan pengujian karakteristik agregat yang meliputi uji keausan, setara pasir, berat jenis dan penyerapan agregat kasar dan halus (bulk, SSD, dan apparent), persentase partikel pecah, kelekatan agregat terhadap aspal, bentuk agregat pipih dan lonjong, kekekalan bentuk, kandungan agregat lolos saringan No. 200, serta analisis gradasi melalui uji saringan. Penelitian ini menggunakan serat selulosa Viatop 66 sebagai bahan penstabil campuran SMA, yang ditambahkan pada proses pencampuran aspal panas setelah agregat mencapai suhu pencampuran. Penambahan serat selulosa bertujuan untuk meningkatkan stabilitas dan kohesi campuran serta kuat tarik aspal.

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari Aspal Pen 60/70 produksi Pertamina dan Asbuton murni jenis Lawele produksi PT Buton Asphalt Indonesia (BAI), yang termasuk dalam klasifikasi aspal Pen 40/60. Karakteristik material pengikat dievaluasi melalui pengujian sifat fisik dan reologi, meliputi uji penetrasi, titik lembek, viskositas sebelum dan sesudah *Thin Film Oven Test* (TFOT), kehilangan berat akibat pemanasan, serta indeks penetrasi.

Respons elastik dan viskoelastik suatu material sangat dipengaruhi oleh sifat material penyusunnya serta metode pembentukan struktur internal. Studi pada sistem biopolimer berbasis nanofiber menunjukkan bahwa optimasi komposisi material dan metode fabrikasi mampu meningkatkan stabilitas mekanik serta respons material terhadap perubahan kondisi termal dan pembebanan (Syed et al., 2024; Syed, Qubro, et al., 2025). Temuan ini memperkuat bahwa modifikasi aspal menggunakan Asbuton Lawele murni berkontribusi terhadap peningkatan modulus resilien campuran SMA, khususnya pada temperatur tinggi.

Perencanaan campuran beraspal panas dilakukan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) menggunakan metode Marshall melalui evaluasi karakteristik bahan, parameter volumetrik, dan sifat Marshall. Pada kondisi KAO, selanjutnya dilakukan pengujian laboratorium lanjutan yang meliputi uji Marshall, pengujian modulus resilien menggunakan *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA), serta pengujian kelelahan dengan *Beam Fatigue Apparatus* guna mengevaluasi kinerja mekanistik campuran beraspal. Ketahanan terhadap degradasi akibat pembebanan berulang merupakan karakteristik penting pada berbagai sistem material rekayasa. Penelitian terdahulu pada material berbasis polimer dan nanofiber menunjukkan bahwa struktur material dan metode pemuatan berpengaruh signifikan terhadap laju degradasi kekakuan dan umur kelelahan material (Syed, Al Qubro, et al., 2025; Syed, Khan, et al., 2025).

Pengujian Kinerja Campuran Beraspal

1. Pengujian Marshall

Pengujian Marshall bertujuan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) yang dapat digunakan dalam campuran aspal dan agregat. Pengujian terhadap campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) dengan penambahan aditif Asbuton dilaksanakan berdasarkan standar AASHTO, yang menetapkan penggunaan tiga benda uji pada setiap kadar aspal.

2. Pengujian Modulus Resilien

Pengujian modulus resilien pada campuran SMAB dilakukan menggunakan Universal Material Testing Apparatus (UMATTA). Dalam penelitian ini pengujian direncanakan pada temperatur 35°C dan 45°C.

3. Pengujian Kelelahan (Fatigue)

Pengujian kelelahan dilakukan menggunakan *Beam Fatigue Apparatus* pada temperatur 20°C. Pengujian ini menerapkan metode pembebanan *controlled strain* dengan tiga variasi tingkat regangan. Semua pengujian dilakukan pada frekuensi 8 Hz (8 siklus per detik) dengan pola pembebanan sinusoidal.

HASIL

Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian material agregat dilakukan untuk menilai karakteristik fisik dari agregat kasar, agregat halus, dan filler yang akan digunakan, guna memastikan kesesuaiannya dengan ketentuan spesifikasi. Berikut merupakan hasil dari pengujian agregat dalam penelitian ini yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karkateristik Agregat

Pengujian	Spesifikasi		Hasil pengujian	Stadar Uji
	Min	Mak		
Berat Jenis Bulk, gr/cm ³	2,5	-	2,640	SNI 1969:2008
Berat Jenis SSD, gr/cm ³	2,5	-	2,666	
Berat Jenis Semu, gr/cm ³	2,5	-	2,743	
Berat Jenis Efektif, gr/cm ³	2,5	-	2,687	SNI 1969:2008
Penyerapan Air, %	-	3	1,407	SNI 1970:2008
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan Natrium Sulfat, %	-	12	4,06	SNI 3407:2008
Abrasi dengan Mesin Los Angeles, %	-	30	17,47	SNI 2417:2008
Kelekatan agregat terhadap aspal, %				
- Aspal Pertamina Pen 60/70	95	-	98	SNI 2439:2011
- Aspal Starbit E-55			99	
- Aspal Pertamina Pen 60/70 + Asbuton 2 %			98	
Agregat Impact Value (AIV)	-	30	17,47	BS 812-112-1990
Agregat Crushing Value (ACV)	-	30	9,72	BS 812-110-1990
Partikel pipih dan lonjong, %	-	5	0,8	RSNI T-01-2005
Material lolos saringan No. 200, %	-	2	0.505	

Sumber: Diambil dari (Qubro et al., 2025)

Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian karakteristik fisik dilakukan untuk menilai sifat Aspal Pen 60/70 produksi Pertamina, Aspal Pen 60/70 yang dimodifikasi menggunakan Asbuton hasil ekstraksi penuh sebesar 2%, serta aspal modifikasi polimer Starbit E-55. Seluruh rangkaian pengujian dilaksanakan sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Rekapitulasi hasil pengujian sifat fisik aspal ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Aspal

Jenis pengujian	Standar Uji	Pen 60/70		PMA 2%		Starbit E-55	
		Spesifikasi	Hasil uji	Spesifikasi	Hasil uji	Spesifikasi	Hasil uji
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60 – 70	64,5	Min. 50	51,3	Min.40	51,1
Viskositas 135°C (cSt)	SNI 03-6721-2002	≥ 300	390,22	385-2000	612,58	≤ 3000	1000
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48	51	≥ 53	53,5	≥ 54	56
Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100	≥ 100	≥ 100	≥ 100	≥ 100	≥ 100
Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232	338	≥ 232	342	≥ 232	331
Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-03	≥ 99	99,32	≥ 90	99,40	≥ 99	99,9
Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0	1,036	≥ 1,0	1,039	≥ 1,0	1,046
Berat yang Hilang (%)	SNI 06-2441-1991	≤ 0,8	0,002	≤ 0,8	0,003	-	0,008
Penetrasi pada 25°C (%)	SNI 06-2456-1991	≥ 54	60,5	≥ 54	48,5	≥ 40	50,2
Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100	≥ 100	≥ 50	≥ 100	≥ 25	≥ 100
Keelastisan setelah pengembalian (%)	AASHTO T 302-00	-	-	-	-	> 60	62,5

Sumber: Diambil dari (Qubro et al., 2025)

Pengujian Marshall

Pengujian Marshall dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik campuran beraspal melalui parameter stabilitas, kelelahan (*flow*), rongga udara dalam campuran (Voids in Mix/VIM), dan rongga di antara mineral agregat (Voids in Mineral Aggregate/VMA). Berdasarkan hasil pengujian tersebut, Kadar Aspal Optimum (KAO) ditentukan sesuai dengan ketentuan SNI 8129:2015 untuk campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA), dengan metode pengujian campuran beraspal panas menggunakan alat Marshall yang mengacu pada RSNI M-01-2003.

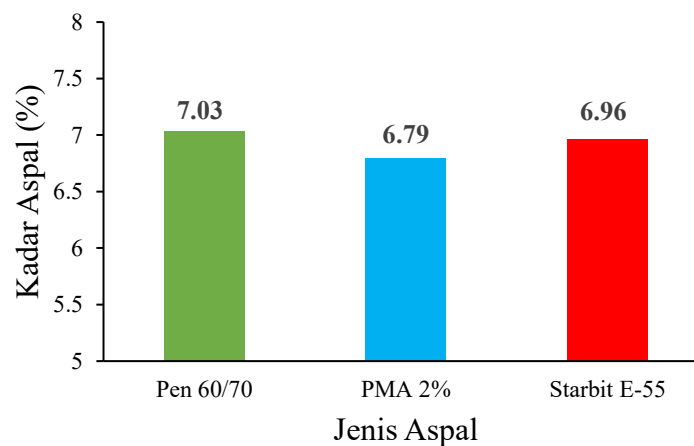
Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) ditetapkan sebagai nilai tengah dari rentang kadar aspal minimum dan maksimum yang memenuhi seluruh persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Nilai KAO untuk masing-masing campuran selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pengujian tahap berikutnya. Hasil penentuan nilai KAO berdasarkan pengujian Marshall disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Parameter Marshall pada Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran SMA

Sifat-sifat campuran	Aspal Pen 60/70	Aspal PMA 2%	Aspal Starbit E-55	Spesifikasi
KAO; %	7,03	6,79	6,96	6 - 7
Stabilitas; Kg	638	678	707	Min. 600
Kelelehan; mm	3,20	4,03	4,27	2 - 4,5
Marshall Quotient; Kg/mm	199,84	171,93	165,38	-
VIM; %	4,42	4,91	4,22	4 - 5
VMA; %	19,83	19,73	19,40	Min. 17
Binder Draindown; %	0,02	0,00	0,00	Maks. 0,3

Sumber: Diambil dari (Qubro et al., 2025)

Tabel di atas menunjukkan parameter Marshall campuran SMA pada Kadar Aspal Optimum (KAO) untuk masing-masing jenis aspal. Selanjutnya, perbandingan nilai KAO antar campuran disajikan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan Kadar Aspal Optimum (KAO) pada Berbagai Variasi Campuran SMA

Berdasarkan hasil analisis penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO), campuran dengan aspal PMA 2% menunjukkan nilai KAO sebesar 6,79%, yang lebih rendah dibandingkan campuran aspal Pen 60/70 (7,03%) dan Starbit E-55 (6,96%). Nilai KAO yang lebih rendah tersebut mengindikasikan bahwa campuran PMA 2% memerlukan proporsi aspal yang lebih kecil, sehingga fraksi agregat dalam campuran menjadi relatif lebih tinggi dibandingkan campuran berbasis aspal Pen 60/70 dan aspal modifikasi Starbit E-55.

Hasil Pengujian Modulus Resilien

Pengujian *modulus resilien* dilakukan menggunakan *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA) dengan benda uji diametral yang memiliki dimensi serupa dengan benda uji Marshall, dan dibuat pada kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO). Pengujian dilaksanakan pada temperatur 35°C dan 45°C dengan mengacu pada *Manual Desain Perkerasan Jalan* (2013), di mana nilai *Mean Annual Pavement Temperature* (MAPT) berada pada kisaran 41°C. Temperatur 45°C dipilih sebagai kondisi ekstrem karena pada suhu tersebut aspal cenderung menunjukkan perilaku viskoelastis yang dominan, sehingga pengujian pada temperatur yang lebih tinggi tidak dilakukan. Hasil pengujian modulus resilien disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian Modulus Resilien

Jenis Campuran	KAO (%)	Suhu Uji (°C)		Standar		Modulus Resilien (MPa)
		35	45	Deviasi (SD)	Coeficient Variant (CV)	
Aspal Pen 60/70	7,03	35	45	23,41	4,30	544
				5,58	3,94	142
Aspal Modifikasi Asbuton 2%	6,79	35	45	28,49	4,93	578
				5,77	2,92	198
Aspal Modifikasi Starbit	6,96	35	45	25,00	3,97	630
				9,80	3,41	288

Sumber: Data Pengujian (2025)

Nilai *Coefficient of Variance* (CV) merupakan rasio antara standar deviasi (SD) dan nilai rata-rata hasil pengujian UMATTA lima pulse yang dinyatakan dalam persen. Berdasarkan *Universal Testing Machine Reference Manual Version 2* (Australia, 1996), nilai CV yang dapat diterima untuk pengujian campuran beraspal jenis laston adalah maksimum 5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh campuran memiliki nilai CV di bawah 5%, sehingga nilai modulus resilien yang diperoleh dinyatakan valid dan dapat diterima. Aspal Pen 60/70 menunjukkan nilai modulus resilien sebesar 544 MPa pada suhu 35°C dan 142 MPa pada 45°C, Aspal Modifikasi Asbuton 2% sebesar 578 MPa dan 198 MPa, sedangkan Aspal Modifikasi Starbit menghasilkan nilai tertinggi yaitu 630 MPa dan 288 MPa, yang mencerminkan kinerja kekakuan terbaik pada kedua suhu pengujian.

Hasil Pengujian Kelelahan (Fatigue)

Pengujian kelelahan (fatigue) bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap keruntuhan akibat pembebanan berulang dengan pendekatan mekanistik. Pengujian dilakukan menggunakan metode pembebanan empat titik (*Four Point Loading*) pada benda uji balok dengan kontrol regangan, mengacu pada AASHTO T-321 (2010). Pembebanan diberikan secara sinusoidal dengan frekuensi 8,06 Hz. Kondisi kegagalan ditetapkan ketika nilai modulus kekakuan lentur (*flexural stiffness*) menurun hingga 50% dari nilai awal, sedangkan jumlah siklus pembebanan hingga kondisi tersebut dicatat sebagai umur kelelahan. Hasil pengujian kelelahan dengan kontrol regangan untuk ketiga variasi campuran pada tiga tingkat regangan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian Kelelahan (Fatigue)

Jenis campuran	Regangan Tarik (µε)		Tegangan Tarik (kPa)		Flexural Stiffness (MPa)			Umur Kelelahan (cycles)
	initial	current	initial	current	initial	current	termination	
	Aspal Pen 60/70	402	399	1.523	755	3.791	1.892	
497		501	1.803	901	3.636	1.799	1.813	36.140
599		602	2.125	1.058	3.544	1.760	1.772	34.860
Aspal PMA 2%	399	401	2.055	1.677	5.145	4.182	2.573	242.660
	499	498	1.990	992	3.989	1.991	1.994	67.820
	601	601	1.972	982	3.281	1.634	1.641	40.990
Aspal Modifikasi Starbit	401	399	1.569	778	3.910	1.949	1.955	282.370
	499	499	1.717	857	3.440	1.717	1.720	125.870
	601	598	2.094	1.042	3.484	1.740	1.742	78.840

Sumber: Data Pengujian (2025)

Dari hasil pengujian kelelahan dengan pembebanan 4 titik ini juga diperoleh nilai *flexural stiffness* dan pengulangan pembebanan hingga runtuh (*cycles*). Terlihat bahwa keruntuhan (*failure*) dari tiap benda uji terjadi pada nilai 50% dari *flexural stiffness*. Campuran dengan Aspal Pen 60/70 menunjukkan umur kelelahan terendah pada seluruh tingkat regangan, dengan penurunan signifikan dari 161.730 siklus pada regangan ±400 µε menjadi 34.860 siklus pada regangan ±600 µε. Sebaliknya, campuran SMA dengan Aspal PMA 2% menunjukkan peningkatan ketahanan kelelahan, khususnya pada regangan rendah, dengan umur kelelahan mencapai 242.660 siklus dan berada pada kisaran 40.990–67.820 siklus pada regangan menengah hingga tinggi. Kinerja kelelahan terbaik ditunjukkan oleh campuran dengan Aspal Modifikasi Starbit, yang mencatat umur kelelahan tertinggi pada seluruh tingkat regangan, yaitu 282.370 siklus pada regangan ±400 µε dan tetap lebih unggul pada regangan yang lebih tinggi, mencerminkan efektivitas modifikasi polimer dalam meningkatkan ketahanan terhadap pembebanan berulang.

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran SMA dengan aspal modifikasi memiliki kinerja mekanistik yang lebih baik dibandingkan aspal Pen 60/70. Nilai modulus resilien campuran PMA 2% mencapai 578 MPa pada suhu 35°C dan 198 MPa pada 45°C, lebih tinggi dibandingkan aspal Pen 60/70 yang masing-masing sebesar 544 MPa dan 142 MPa. Dari pengujian kelelahan, umur kelelahan campuran PMA 2% mencapai 242.660 siklus pada regangan $\pm 400 \mu\epsilon$, meningkat signifikan dibandingkan aspal Pen 60/70 sebesar 161.730 siklus, sementara kinerja terbaik ditunjukkan oleh aspal modifikasi Starbit dengan umur kelelahan tertinggi mencapai 282.370 siklus. Hasil ini menunjukkan bahwa Asbuton Lawele murni (PMA 2%) berpotensi sebagai bahan pengikat lokal alternatif yang mampu meningkatkan kinerja struktural dan ketahanan kelelahan campuran SMA.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwidodo, A. I., Rahman, H., & Zain, N. (2023). Analisis Kinerja Modulus Resilien dan Ketahanan Fatigue Campuran AC - WC dengan Asbuton Murni , BNA Blend , dan Aspal Pen 60 / 70. 30(3), 481–490. <https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.3.16>
- Arham, Hasbi, B., & Bakri, S. (2024). Studi Kualitas Aspal Buton PT Wijaya Karya Bitumen , Kabupaten Buton , Provinsi Sulawesi Tenggara Buton Asphalt Quality Study of PT Wijaya Karya Bitumen , Buton Regency , Southeast Sulawesi Province. *Journal Of Engineering Science and Technology Applications*, 2(2), 73–79. <https://doi.org/10.58227/jesta.v2i2.208>
- Autelitano, F., Petrolo, D., Chiapponi, L., Giuliani, F., & Longo, S. (2022). Temporary clogging effects induced by a sustainable anti-icing hydrogel on the hydraulic conductivity and inertia coefficient of open-graded asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 361, 129495. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129495>
- Chasanah, F., & Putra, F. A. (2019). *Effects of Using Limestone as a Filler and Starbit E-55 Asphalt as a Binder on the Performance of AC – WC Mixture*. 5.
- Do, T. C., Nguyen, T. H., & Nguyen, V. L. (2025). Experimental study on the resistance of asphalt mixtures to permanent deformation and its relation to mechanical behavior of pavement structures. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04248. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2025.E04248>
- Febrianto, I., Adiman, E. Y., Hamdi, B., & Putra, R. (2024). *Potensi Penggunaan Serat Tebu Sebagai Substitusi Serat Selulosa Pada Campuran Stone Matrix Asphalt*. 2, 20–30. <https://doi.org/10.56208/jictech.2.1.20-30>
- Hariyadi, E. S. (2022). Evaluasi Pengaruh Sudut Putaran pada Pemadatan Campuran Beraspal Menggunakan Superpave Gyrotory Compactor (SGC) Terhadap Kinerja Fatigue dan Resilient Modulus pada Stone Matrix Asphalt (SMA). 29(2), 171–180. <https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.2.8>
- Himawan, T. (2019). Kebutuhan Angkutan Laut yang Menghubungkan Pulau-Pulau Terpencil di Wilayah Kepulauan Riau. *Warta Penelitian Perhubungan*, 26(6), 287. <https://doi.org/10.25104/warlit.v26i6.899>
- Khani, H., Babagoli, R., & Mohammadi, R. (2025). Case Studies in Construction Materials Enhancing stone matrix asphalt performance with sugarcane bagasse ash : Mechanical properties and machine learning-based predictions using XGBoost and random forest. *Case Studies in Construction Materials*, 23(March), e05186. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05186>
- Lestari, D. D., Studi, P., Sipil, T., Muhammadiyah, U., Raya, P., Pahandut, K., & Raya, K. P. (2022). Pengaruh variasi campuran serat bambu pada kuat tekan beton serat. 15, 1–7.
- Ma, F., Dong, W., Fu, Z., Wang, R., Huang, Y., & Liu, J. (2021). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance : A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125595. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125595>
- Nugraha, M. A., Aschuri, I., & Parapat, R. Y. (2025). Analisis Kinerja Campuran Beton Aspal yang Mengandung Butiran Mineral Hasil Ekstraksi Aspal Buton sebagai Filler. 2(04), 7199–7207.
- Qubro, K. Al, Marguan, F., Sartika, N., Febryandi, & Sri, H. (2025). Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Menggunakan Aspal Modifikasi Asbuton Murni Lawele. 8(2), 885–891. <https://doi.org/10.33087/talentsipil.v8i2.1014>
- Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2021). *Sustainable pavement construction : A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials*. *Journal of Cleaner Production*, 313(January), 127936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>
- Suaryana, N., Susanto, I., Ronny, Y., Sembayang, I. R., Penelitian, P., Pekerjaan, K., & Rakyat, P. (2018). Evaluasi Kinerja Campuran Beraspal dengan Bitumen Hasil Ekstraksi Penuh dari Asbuton. 24(1), 62–70.
- Syed, M. H., Al Qubro, K., Khan, M. M. R., Zahari, M. A. K. M., & Abdullah, N. (2025). *An Insight Into the Drug Release Kinetics of Polylactic Acid/Chitosan/Nanocellulose Nanofibers: Effect of Preparation Method on Drug Release Kinetics*. *Journal of Polymer Science*, 63(22), 4829–4837. <https://doi.org/10.1002/pol.20250609>

Khodijah Al Qubro*, Murtaza Haider Syed, Ghina Amalia, Iva Nazila, Sri Hendarto, Rio Ramadhan, Miftahul Jannah Lubis: *Evaluasi Modulus Resilien dan Perilaku Fatigue Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Menggunakan Aspal Modifikasi Asbuton Murni Lawele*

- Syed, M. H., Khan, M. M. R., Abdullah, N., & Zahari, M. A. K. M. (2025). *Effect of drug loading on sustained release through needleless electrospun nanocellulose/chitosan/polylactic acid based drug delivery system. International Journal of Biological Macromolecules*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147843>
- Syed, M. H., Khan, M. M. R., Zahari, M. A. K. M., Beg, M. D. H., & Abdullah, N. (2023). *Current issues and potential solutions for the electrospinning of major polysaccharides and proteins: A review. In International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 253). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126735>
- Syed, M. H., Khan, M. M. R., Zahari, M. A. K. M., Beg, M. D. H., & Abdullah, N. (2024). *Optimization of solvent system for chitosan/polylactic acid/nanocellulose nanofibers using needleless electrospinning. Journal of Applied Polymer Science*, 141(48). <https://doi.org/10.1002/app.56291>
- Syed, M. H., Qubro, K. Al, Khan, M. M. R., Razak, A. S. B. A., Kuan, Y. X., & Zahari, M. A. K. M. (2025). *Assessing morphological effect on antimicrobial activity using needleless electrospinning. Emerging Materials Research*, 14(3), 280–291. <https://doi.org/10.1680/jemmr.25.00053>
- Widianto, B. W., Purwanti, O. K. A., & Triana, S. (2025). *Penentuan Modulus Resilien Berdasarkan Indirect Tensile Strength (ITS) pada Campuran AC-WC Menggunakan Aspal PG-76 dengan Gradasi KP 14 Tahun 2021. 11(02)*, 117–126.