

Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan Modifikasi Serat Kelapa dan *Filler* Batu Kapur

M.R. Sugema^{1*}, A.Putri¹, Hanafi¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, INDONESIA

*Corresponding author: rafi.sugema@student.unjani.ac.id

INTISARI

Kerusakan dini pada perkerasan jalan di Indonesia masih sering terjadi akibat beban lalu lintas berat dan kondisi iklim tropis yang ekstrem, seperti suhu tinggi dan curah hujan besar. Permasalahan ini diperparah dengan tingginya ketergantungan terhadap material impor pada campuran Stone Matrix Asphalt (SMA), seperti serat selulosa dan filler semen, yang berdampak pada meningkatnya biaya serta menurunkan aspek keberlanjutan konstruksi jalan. Sebagai solusi berbasis material lokal, penelitian ini mengevaluasi kinerja SMA yang dimodifikasi menggunakan serat kelapa sebagai stabilisator alami dan serbuk batu kapur sebagai filler. Variasi campuran meliputi SMA kontrol, serat kelapa 0,3%, filler batu kapur 10%, serta kombinasi keduanya. Pengujian meliputi Marshall Stability Test, Cantabro Loss Test, Drain-down Test, dan Indeks Stabilitas Sisa (ISS), mengacu pada SNI dan standar internasional. Hasil menunjukkan bahwa seluruh campuran memenuhi spesifikasi Bina Marga (2018). Kombinasi kedua bahan memberikan hasil paling optimal dengan stabilitas dan durabilitas tinggi, drain-down rendah, serta ISS di atas 90%. Pemanfaatan serat kelapa dan batu kapur lokal berpotensi menghasilkan campuran SMA yang kuat, ekonomis, dan berkelanjutan untuk perkerasan jalan di Indonesia.

Kata kunci: *Stone Matrix Asphalt*, serat kelapa, *filler* batu kapur, stabilitas *Marshall*, durabilitas.

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan merupakan infrastruktur transportasi darat yang memiliki peran vital dalam mendukung konektivitas dan pertumbuhan ekonomi suatu negara. Di Indonesia, peningkatan volume lalu lintas setiap tahunnya, ditambah dengan kondisi iklim tropis yang ekstrem berupa curah hujan tinggi dan temperatur yang fluktuatif, menyebabkan terjadinya kerusakan dini pada perkerasan jalan, seperti retak, alur (*rutting*), dan kehilangan butiran (*raveling*). Fenomena ini telah dijelaskan oleh Sukirman (1999) yang menyatakan bahwa kondisi iklim dan beban lalu lintas berlebih berkontribusi signifikan terhadap kerusakan dini jalan raya. Dampak yang ditimbulkan adalah meningkatnya biaya pemeliharaan, penurunan umur rencana jalan, serta terganggunya kinerja sistem transportasi. Oleh karena itu, inovasi dalam teknologi material perkerasan yang kuat, tahan lama, ekonomis, dan ramah lingkungan menjadi suatu kebutuhan.

Salah satu jenis campuran beraspal yang banyak diteliti adalah *Stone Matrix Asphalt* (SMA). Menurut Putra & Suaryana (2015), SMA memiliki keunggulan berupa ketahanan tinggi terhadap deformasi plastis, stabilitas struktural yang baik, serta durabilitas tinggi berkat desain gradasinya yang berbasis kerangka agregat kasar dengan mortar aspal–filler sebagai pengikat. Meskipun demikian, kinerja SMA sangat dipengaruhi oleh jenis bahan tambah, khususnya serat sebagai stabilisator *drain-down* dan filler sebagai pengisi rongga sekaligus penguat mortar.

Dalam praktik konstruksi, Brown & Cooley (1999) melaporkan bahwa serat selulosa sintetis impor lazim digunakan untuk mencegah peluruhan aspal, sedangkan *filler* semen atau abu batu sering dipakai untuk memperkuat adhesi aspal–agregat serta meningkatkan kepadatan campuran. Namun, penggunaan material impor ini memicu permasalahan berupa meningkatnya biaya produksi dan ketergantungan terhadap bahan non-lokal, sehingga mengurangi keberlanjutan pembangunan jalan.

Sebagai solusi, pemanfaatan material lokal menjadi pendekatan yang strategis. Satyanarayana et al. (2007) menegaskan bahwa serat kelapa, dengan kandungan lignin dan selulosa yang tinggi, memiliki sifat mekanis yang cukup baik, seperti kekuatan tarik dan elastisitas, sehingga berpotensi digunakan sebagai tulangan mikro (*micro-*

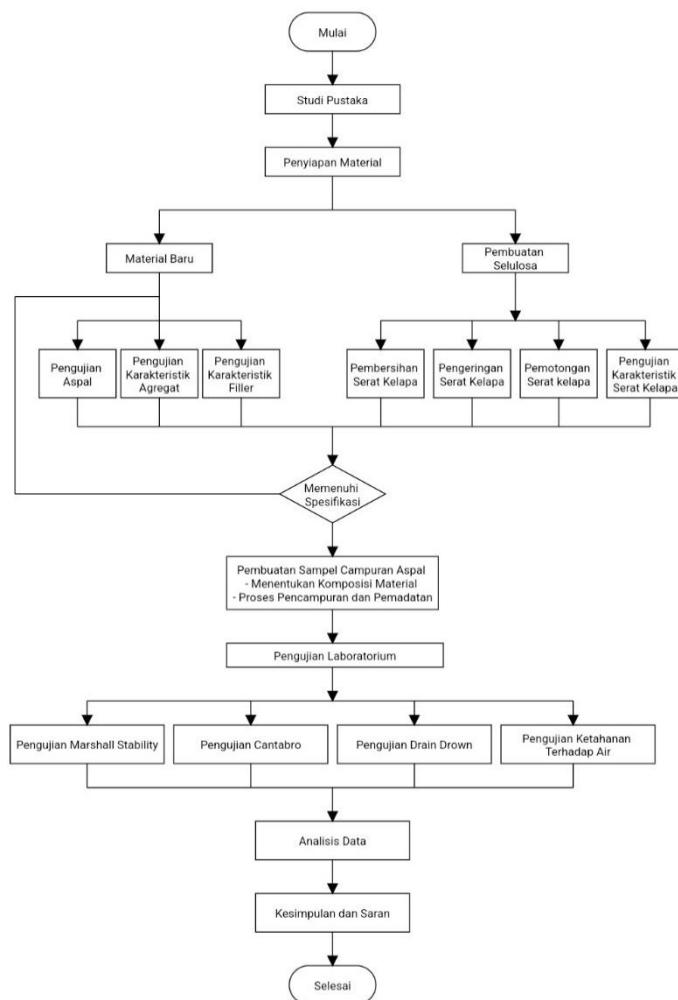
reinforcement). Kehadirannya mampu meningkatkan kohesi, menahan *drain-down*, serta memperbaiki ketahanan campuran terhadap retak dan aus.

Selain itu, Yilmaz & Sütaş (2013) menunjukkan bahwa serbuk batu kapur, yang kaya akan kalsium karbonat (CaCO_3), dapat memperbaiki adhesi aspal-agregat, mengurangi rongga udara, serta meningkatkan stabilitas campuran. Penggunaan *filler* batu kapur juga dilaporkan mampu memperkaya mortar aspal sekaligus meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini perlu dilakukan untuk menjawab tantangan ketersediaan bahan stabilisator dan *filler* yang ramah lingkungan sekaligus menekan biaya produksi. Pemanfaatan serat kelapa dan serbuk batu kapur sebagai bahan lokal diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada bahan impor, mendukung konsep *green pavement technology*, serta membuka peluang inovasi material berkelanjutan di bidang teknik jalan. Penelitian ini juga menjadi langkah awal untuk memahami potensi kombinasi kedua bahan tersebut dalam meningkatkan kinerja mekanis campuran SMA.

2 METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium untuk mengevaluasi kinerja mekanis *Stone Matrix Asphalt* (SMA) yang dimodifikasi dengan penambahan serat kelapa dan *filler* serbuk batu kapur. Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagaimana digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alur Penelitian

2.1 Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan terdiri dari:

1. Aspal: Aspal penetrasi 60/70, sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.
2. Agregat: Agregat kasar dan halus berasal dari sumber lokal, dengan gradasi yang disusun mengikuti amplop gradasi SMA.
3. Serat kelapa: Diambil dari sabut kelapa, melalui proses pencucian, pengeringan, pemotongan (1–2 mm), dan pengujian kadar air untuk memastikan kondisi kering.
4. *Filler* batu kapur: Serbuk halus yang lolos saringan No. 200 (0.075 mm), digunakan sebagai pengisi mortar aspal.

2.2 Rancangan Variasi Campuran

Campuran SMA pada penelitian ini menggunakan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 6.2% yang diperoleh berdasarkan metode *Marshall* sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Nilai KAO ini digunakan secara konsisten pada seluruh variasi campuran untuk memastikan hasil pengujian dapat dibandingkan secara langsung.

Empat variasi campuran dirancang sebagai berikut:

Tabel 1 Variasi Campuran Bahan Uji

No	Serat Kelapa	Serbuk Batu Kapur	Keterangan
1	Tidak digunakan	Tidak digunakan	Campuran SMA standar (kontrol)
2	Digunakan (0,3%)	Tidak digunakan	SMA + Serat Kelapa
3	Tidak digunakan	Digunakan (10%)	SMA + Filler Serbuk Batur Kapur
4	Digunakan (0,3%)	Digunakan (10%)	SMA + Serat Kelapa + Filler Serbuk Batur Kapur

*Jumlah benda uji per variasi adalah 12 sampel, terdiri dari 3 sampel untuk masing-masing jenis uji (*Marshall*, *Cantabro*, *Drain-down*, dan ISS). Total keseluruhan benda uji penelitian adalah 48 sampel.

2.3 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan melalui beberapa langkah:

1. Persiapan material: Uji sifat fisik agregat dan aspal, serta perlakuan awal pada serat kelapa dan serbuk batu kapur.
2. Perancangan gradasi agregat: Menentukan amplop gradasi sesuai spesifikasi SMA Bina Marga.
3. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO): Berdasarkan metode *Marshall*.
4. Pembuatan benda uji: Benda uji Marshall dibuat sesuai variasi campuran.
5. Pelaksanaan pengujian laboratorium: Stabilitas dan *flow Marshall*, *Cantabro Loss*, *Drain-down*, dan Indeks Stabilitas Sisa (ISS) sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam AASHTO (2008), SNI (1991), AASHTO (2014) dan SNI (2015)
6. Analisis data: Perhitungan rata-rata, simpangan baku, serta evaluasi kesesuaian hasil dengan standar spesifikasi.

2.4 Parameter Uji dan Kriteria Spesifikasi

Parameter uji yang digunakan adalah:

- Stabilitas *Marshall* (kg): Mengukur kekuatan struktural campuran.
- *Flow* (mm): Mengukur deformasi plastis pada beban maksimum.
- *Marshall Quotient* (MQ, kg/mm): Rasio stabilitas terhadap flow, menggambarkan kekakuan.
- *Cantabro Loss* (%): Menilai ketahanan terhadap kehilangan partikel akibat abrasi.
- *Drain-down* (%): Mengukur stabilitas aspal terhadap peluruhan pada suhu tinggi.

- Indeks Stabilitas Sisa (ISS, %): Menilai ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat kelembaban.

Hasil pengujian dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Tabel 2).

Tabel 2 Ketentuan Sifat-sifat Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Sifat - Sifat Campuran	SMA	SMA Mod
	Tipis, Halus dan Kasar	Tipis, Halus dan Kasar
Jumlah tumbukan per bidang		50
Rongga dalam campuran (%)	Min.	4,0
	Maks.	5,0
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	17
Rasio VCAmix/VCAdrcc		<1
Draindown pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam)	Maks.	0,3
Stabilitas Marshall (Kg)	Min.	600
	Min.	2
Pelelehan (mm)	Maks.	4,5
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min.	90
Stabilitas dinamis (lintasan/mm)	Min.	2500
		3000

Sumber : Bina Marga (2018)

2.5 Analisis Data

Data hasil uji laboratorium dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif (nilai rata-rata dan simpangan baku). Nilai yang diperoleh dibandingkan dengan kriteria spesifikasi untuk menilai kelayakan campuran. Analisis juga diarahkan untuk mengidentifikasi efek serat kelapa, *filler* batu kapur, serta kombinasi keduanya terhadap stabilitas, fleksibilitas, dan durabilitas campuran SMA.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Marshall (Stabilitas, Flow, dan Marshall Quotient)

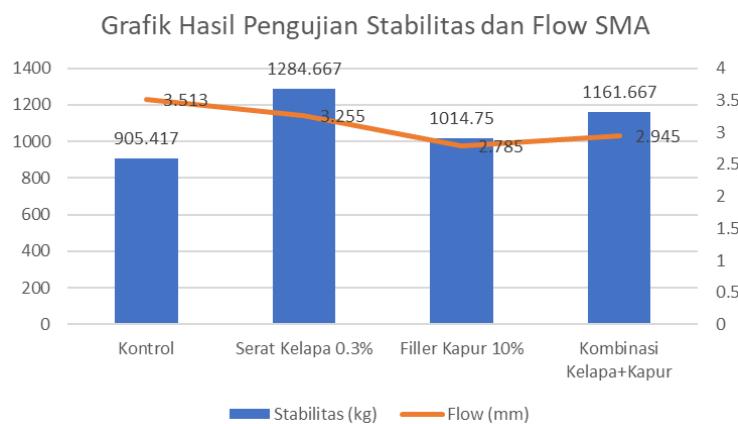
Hasil pengujian *Marshall* untuk seluruh variasi campuran disajikan pada Tabel 3. Parameter yang dianalisis meliputi Stabilitas *Marshall*, *Flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ).

Tabel 3 Hasil pengujian *Marshall* SMA dengan variasi serat kelapa dan *filler* batu kapur

Variasi Campuran	Stabilitas (kg) ± SD	Flow (mm) ± SD	MQ (kg/mm) ± SD
Kontrol (tanpa serat, tanpa kapur)	905.417 ± 66.691	3.513 ± 1.006	267.837 ± 55.171
Serat Kelapa 0.3%	1284.667 ± 93.006	3.255 ± 0.559	400.059 ± 53.106
Filler Kapur 10%	1014.750 ± 57.070	2.785 ± 0.137	365.465 ± 36.677
Kombinasi (0.3% Kelapa + 10% Kapur)	1161.667 ± 59.178	2.945 ± 0.767	413.260 ± 108.591

Sumber: Pengujian Laboratorium (2025)

Berdasarkan Tabel 3, seluruh variasi memenuhi persyaratan Stabilitas Marshall ≥ 600 kg dan *Flow* 2–4 mm sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga (2018). Grafik pada Gambar 2 menunjukkan tren peningkatan stabilitas pada variasi dengan serat kelapa dan kombinasi, serta penurunan nilai *flow* pada variasi dengan *filler* kapur.



Gambar 2 Grafik hubungan stabilitas dan *flow* pada variasi campuran SMA

Analisis menunjukkan bahwa penambahan serat kelapa meningkatkan stabilitas sebesar $\pm 42\%$ dibandingkan kontrol. Temuan ini sejalan dengan penelitian Satyanarayana et al. (2007), yang melaporkan bahwa serat kelapa berfungsi sebagai *micro-reinforcement* yang meningkatkan kohesi internal dan kekuatan tarik campuran. Sementara itu, hasil penelitian ini juga konsisten dengan laporan Brown & Cooley (1999), yang menegaskan bahwa *filler* berperan memperkaya mortar aspal dan meningkatkan stabilitas struktural. Kombinasi keduanya menghasilkan nilai MQ tertinggi (413.260 kg/mm), mengindikasikan sinergi antara kekuatan dan fleksibilitas.

3.2 Hasil Uji *Cantabro* (Durabilitas)

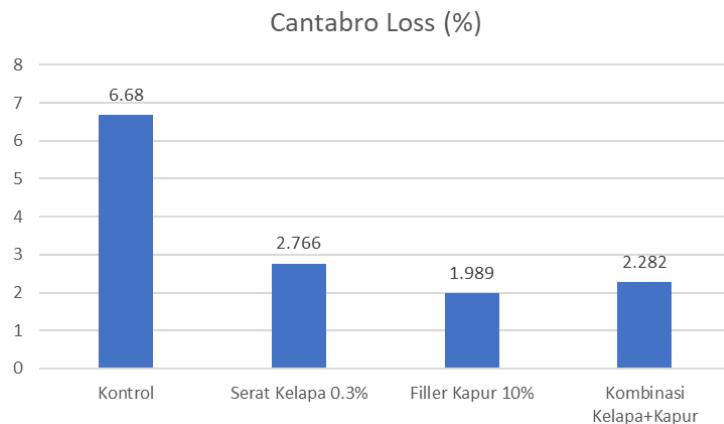
Durabilitas campuran dievaluasi dengan uji *Cantabro Loss*, yang mengukur kehilangan berat akibat abrasi. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pengujian Cantabro Loss

Variasi Campuran	Cantabro Loss (%) \pm SD
Kontrol	6.680 \pm 3.338
Serat Kelapa 0.3%	2.766 \pm 0.540
Filler Kapur 10%	1.989 \pm 0.611
Kombinasi	2.282 \pm 0.271

Sumber: Pengujian Laboratorium (2025)

Seluruh campuran berada di bawah batas maksimum seperti yang tertera pada Bina Marga (2018) yaitu 15%. Grafik pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa penambahan serat kelapa maupun *filler* batu kapur menurunkan kehilangan berat secara signifikan dibandingkan kontrol.

Gambar 3 Nilai *Cantabro Loss* pada variasi campuran SMA

Temuan ini sesuai dengan Satyanarayana et al. (2007), yang menemukan bahwa serat kelapa mampu mengurangi kehilangan partikel melalui pembentukan jejaring tiga dimensi dalam campuran. Hasil ini juga sejalan dengan Yilmaz & Sütaş (2013), yang membuktikan bahwa *filler* batu kapur meningkatkan adhesi aspal-agregat sehingga campuran lebih tahan terhadap abrasi. Kombinasi keduanya menghasilkan nilai kehilangan berat rendah, membuktikan efek sinergis terhadap durabilitas.

3.3 Hasil Uji *Drain Down*

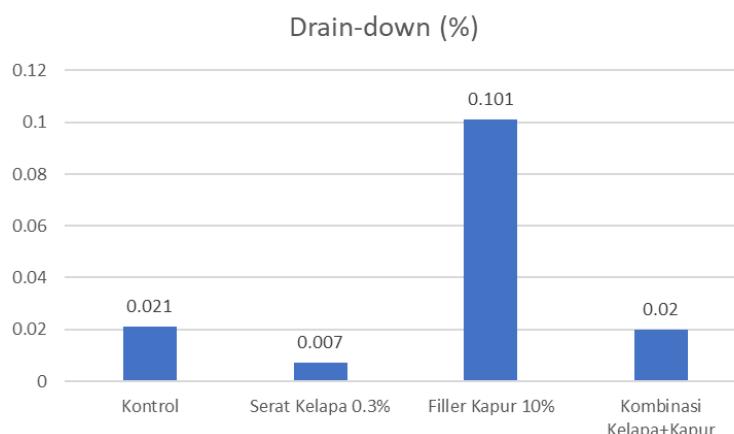
Uji *drain-down* dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan aspal terhadap peluruhan pada suhu tinggi (165°C selama 1 jam). Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil uji *drain-down*

Variasi Campuran Drain-down (%) ± SD	
Kontrol	0.021 ± 0.015
Serat Kelapa 0.3%	0.007 ± 0.002
Filler Kapur 10%	0.101 ± 0.050
Kombinasi	0.020 ± 0.010

Sumber: Pengujian Laboratorium (2025)

Menurut Spesifikasi Bina Marga (2018), batas *drain-down* maksimum adalah 0.3%. Semua campuran memenuhi persyaratan tersebut. Variasi dengan serat kelapa menunjukkan *drain-down* terendah (0.007%), membuktikan efektivitas serat dalam menahan peluruhan aspal. Sebaliknya, penggunaan *filler* kapur cenderung meningkatkan nilai *drain-down*, yang diduga akibat interaksi agregat-*filler* yang kurang optimal dalam menahan aspal. Kombinasi keduanya tetap memberikan hasil yang aman.

Gambar 4 Nilai *drain-down* pada variasi campuran SMA

Hasil ini mendukung penelitian Panda et al. (2013), yang menyatakan bahwa serat nabati efektif dalam menahan *drain-down* pada campuran SMA. Di sisi lain, tren *drain-down* tinggi pada *filler* kapur sesuai dengan catatan Brown & Cooley (1999), bahwa penggunaan *filler* mineral dapat memengaruhi distribusi aspal dalam matriks, terutama jika kadar filler tidak optimal.

3.4 Hasil Uji Indeks Stabilitas Sisa (ISS)

Uji ISS dilakukan untuk menilai ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat kelembaban. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6.

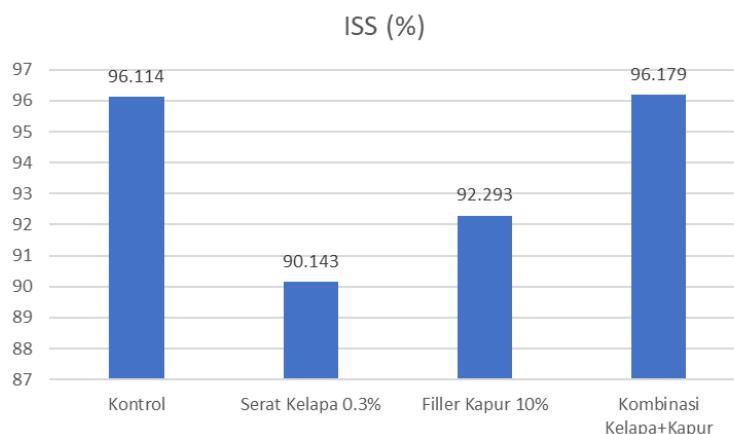
Tabel 6 Hasil uji Indeks Stabilitas Sisa (ISS)

Variasi Campuran	ISS (%) ± SD
Kontrol	96.114 ± 1.190
Serat Kelapa 0.3%	90.143 ± 0.070
Filler Kapur 10%	92.293 ± 2.345
Kombinasi	96.179 ± 3.271

Sumber: Pengujian Laboratorium (2025)

Semua variasi campuran menunjukkan nilai ISS di atas 90%, sehingga memenuhi persyaratan minimum sesuai Bina Marga (2018). Nilai tertinggi diperoleh pada campuran kombinasi (96.179%), yang bahkan melampaui kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa efek sinergis antara serat kelapa dan *filler* kapur mampu mempertahankan stabilitas campuran meskipun terpapar kelembaban.

Sebaliknya, variasi dengan serat kelapa tunggal menunjukkan ISS terendah (90.143%), meskipun masih di atas ambang batas. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh sifat serat yang menyerap air, sehingga sedikit mengurangi ketahanan ikatan aspal-agregat. Namun, saat dikombinasikan dengan *filler* batu kapur, kelemahan ini dapat dikompensasi, menghasilkan nilai ISS yang sangat baik.



Gambar 5 Nilai ISS pada variasi campuran SMA

Temuan ini konsisten dengan Yilmaz & Sütaş (2013), yang menyebutkan bahwa *filler* kapur dengan sifat basa mampu meningkatkan ikatan aspal-agregat dan memperbaiki ketahanan terhadap kelembaban. Sementara itu, efek penguatan serat kelapa terhadap ISS juga sejalan dengan penelitian Zulkafli et al. (2023), yang melaporkan bahwa serat alam dapat meningkatkan resistensi campuran terhadap kerusakan akibat air melalui peningkatan kohesi internal.

3.5 Rekapitulasi dan Pembahasan Keseluruhan

Tabel 7 Rekapitulasi hasil pengujian SMA

Variasi Campuran	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	Cantabro Loss (%)	Drain-down (%)	ISS (%)
Kontrol	905.417	3.513	267.837	6.680	0.021	96.114
Serat Kelapa 0.3%	1284.667	3.255	400.059	2.766	0.007	90.143
Filler Kapur 10%	1014.750	2.785	365.465	1.989	0.101	92.293

Variasi Campuran	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	Cantabro Loss (%)	Drain-down (%)	ISS (%)
Kombinasi	1161.667	2.945	413.260	2.282	0.020	96.179

Sumber: Pengujian Laboratorium (2025)

Analisis menyeluruh dari Tabel 3.5 memperlihatkan bahwa seluruh variasi campuran SMA memenuhi persyaratan Bina Marga (2018) untuk stabilitas, *flow*, *Cantabro Loss*, *drain-down*, dan ISS. Namun, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antar variasi yang memberikan gambaran jelas mengenai efek spesifik dari serat kelapa, *filler* batu kapur, maupun kombinasi keduanya.

1. Kontrol vs. Serat Kelapa 0.3%

Dibandingkan dengan kontrol, penambahan serat kelapa meningkatkan stabilitas dari 905.417 kg menjadi 1284.667 kg atau naik sekitar 42%. Nilai MQ juga meningkat signifikan dari 267.837 menjadi 400.059 kg/mm, menandakan adanya penguatan struktural akibat peran serat sebagai tulangan mikro. Flow pada serat kelapa sedikit menurun (3.513 → 3.255 mm), tetapi masih berada dalam batas syarat. Namun, ISS menurun dari 96.114% menjadi 90.143%, yang dapat dijelaskan oleh sifat higroskopis serat kelapa yang cenderung menyerap air, sehingga sedikit melemahkan ikatan aspal-agregat terhadap kelembaban.

2. Kontrol vs. *Filler* Kapur 10%

Penambahan *filler* batu kapur menghasilkan peningkatan stabilitas (905.417 → 1014.750 kg) dan MQ (267.837 → 365.465 kg/mm), sekaligus menurunkan flow (3.513 → 2.785 mm). Hal ini menegaskan bahwa *filler* kapur memperkaya mortar aspal dan meningkatkan kekakuan campuran. Di sisi lain, *Cantabro Loss* menurun drastis dari 6.680% menjadi 1.989%, menunjukkan ketahanan aus yang jauh lebih baik. Akan tetapi, nilai ISS sedikit menurun dari 96.114% menjadi 92.293%, menandakan bahwa *filler* kurang efektif dalam mempertahankan stabilitas saat terpapar kelembaban tinggi.

3. *Filler* Kapur 10% vs. Serat Kelapa 0.3%

Jika dibandingkan secara langsung, serat kelapa memberikan stabilitas lebih tinggi (1284.667 vs. 1014.750 kg) namun durabilitas (*Cantabro Loss*) lebih rendah (2.766% vs. 1.989%). Sebaliknya, *filler* lebih efektif dalam meningkatkan ketahanan aus tetapi kurang unggul dalam menjaga stabilitas terhadap kelembaban. Perbandingan ini menunjukkan bahwa kedua bahan aditif bekerja dengan mekanisme yang berbeda, dan belum tentu saling mengantikan.

4. Kombinasi Serat Kelapa + *Filler* Kapur vs. Kontrol

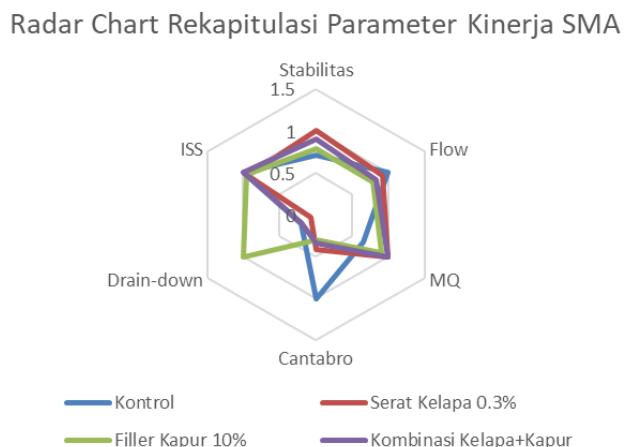
Kombinasi aditif memberikan peningkatan hampir di semua parameter dibanding kontrol: stabilitas naik dari 905.417 → 1161.667 kg, MQ naik dari 267.837 → 413.260 kg/mm, *Cantabro Loss* turun dari 6.680% → 2.282%, *drain-down* tetap terkendali (0.021 → 0.020%), dan ISS meningkat dari 96.114 → 96.179%. Pencapaian ini menegaskan adanya efek sinergis, di mana kelemahan masing-masing aditif dapat ditutupi saat digunakan secara bersamaan.

5. Kombinasi vs. Aditif Tunggal

Dibandingkan dengan serat kelapa atau *filler* kapur tunggal, kombinasi menunjukkan nilai MQ tertinggi (413.260 kg/mm) dan ISS tertinggi (96.179%), sekaligus menjaga durabilitas pada tingkat rendah (*Cantabro Loss* 2.282%). Hal ini mengonfirmasi bahwa kombinasi menghasilkan keseimbangan paling optimal antara kekuatan, fleksibilitas, dan ketahanan terhadap kelembaban.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa serat kelapa lebih berperan dalam meningkatkan stabilitas dan mengurangi *drain-down*, sedangkan *filler* kapur lebih dominan dalam menurunkan *Cantabro Loss* dan meningkatkan kekakuan campuran. Kombinasi keduanya menghasilkan kinerja yang tidak hanya memenuhi tetapi melampaui standar minimum, menjadikannya formulasi yang paling direkomendasikan untuk SMA di kondisi lalu lintas berat dan iklim tropis.

Untuk memberikan gambaran visual yang komprehensif mengenai performa seluruh variasi campuran, dibuat diagram radar berdasarkan parameter utama hasil pengujian



Gambar 6 Perbandingan Kinerja Campuran SMA Berdasarkan Variasi Bahan Tambah

Gambar 6 menunjukkan bahwa kombinasi serat kelapa dan filler batu kapur menghasilkan distribusi kinerja yang paling seimbang, ditandai dengan stabilitas dan *Marshall Quotient* tinggi, nilai *Cantabro Loss* yang rendah, serta *drain-down* yang tetap terkendali.

Perlu dicatat bahwa seluruh hasil pengujian diperoleh pada kondisi material baru (*unaged condition*). Mengingat serat kelapa merupakan bahan organik yang berpotensi mengalami degradasi akibat suhu tinggi dan proses oksidasi, pengaruh penuaan jangka panjang (*aging effect*) terhadap sifat mekanis campuran SMA belum dikaji dalam penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk menilai ketahanan campuran terhadap penuaan termal dan kelembaban jangka panjang guna memastikan keawetan material di lapangan.

Secara teknis, serat kelapa terbukti meningkatkan stabilitas dan menurunkan *drain-down*, namun memiliki kelemahan berupa kecenderungan menyerap kelembaban. Sebaliknya, filler batu kapur memperkuat adhesi aspal-agregat dan menurunkan kehilangan partikel, tetapi sedikit menurunkan fleksibilitas. Kombinasi keduanya mampu menyeimbangkan karakteristik tersebut, menghasilkan campuran dengan performa mekanis yang optimal dan stabilitas struktural yang baik untuk aplikasi perkerasan jalan berlalu lintas tinggi.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) yang dimodifikasi dengan serat kelapa dan filler batu kapur memenuhi persyaratan *Spesifikasi Umum Bina Marga* (2018). Penambahan serat kelapa sebesar 0,3% terbukti meningkatkan stabilitas Marshall, menurunkan *Cantabro Loss*, serta mengurangi *drain-down*, sehingga efektif berperan sebagai stabilisator alami pengganti serat selulosa impor. Penggunaan filler batu kapur sebesar 10% memperkuat adhesi aspal-agregat dan meningkatkan kekakuan campuran, meskipun menyebabkan sedikit penurunan pada nilai *Indeks Stabilitas Sisa (ISS)*. Kombinasi 0,3% serat kelapa dan 10% filler batu kapur menghasilkan performa paling optimal, ditandai dengan stabilitas dan *Marshall Quotient* tinggi, durabilitas baik, nilai *drain-down* terkendali, serta ISS yang tetap memenuhi standar. Meskipun demikian, hasil ini masih terbatas pada kondisi material baru; penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengkaji pengaruh penuaan (*aging*) terhadap performa jangka panjang campuran, mengingat serat kelapa merupakan material organik yang berpotensi mengalami degradasi. Secara keseluruhan, kombinasi kedua material lokal ini dapat direkomendasikan sebagai alternatif formulasi campuran SMA unggul yang ekonomis, berkelanjutan, dan sesuai untuk perkerasan jalan dengan beban lalu lintas tinggi di wilayah beriklim tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Dirgantara Yudha Artha yang telah memberikan dukungan dalam penelitian ini, khususnya melalui penyediaan bahan material yang sangat membantu kelancaran pelaksanaan pengujian di laboratorium. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani atas dukungan dan fasilitasi yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2008). *M325-08: Stone Matrix Asphalt (SMA)*.
- AASHTO. (2014). *T305-14: Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*.
- Brown, E. R., & Cooley, L. A. (1999). *Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements*. https://www.asphaltpavement.org/uploads/documents/SMA/SMA_Designing_Stone_Matrix_Asphalt.pdf
- Marga, D. J. B. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 2*.
- Nasional, B. S. (1991). *SNI 06-2489-1991: Pengujian campuran beraspal dengan alat Marshall*.
- Nasional, B. S. (2015). *SNI 8129:2015: Cara uji ketahanan terhadap kelembaban pada campuran beraspal*.
- Panda, M. R., Chandra, S., & Kumar, P. (2013). Effect of coconut fiber on drain down characteristics of Stone Matrix Asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(5), 449–456. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.743912>
- Putra, I. G. A., & Suaryana, I. G. N. (2015). Analisis Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt dengan Bahan Tambah Serat. *Jurnal Spektran*, 3(2), 15–22. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jsn/article/view/16203>
- Satyanarayana, K. G., Sukumaran, K., Mukherjee, P. S., Pavithran, C., & Pillai, S. G. K. (2007). Natural fibre-polymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 12(2), 117–136. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90049-4](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90049-4)
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Nova.
- Yilmaz, M., & Sütaş, I. (2013). Effects of Limestone Filler Content and Water Resistance on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 41, 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.078>
- Zulkafli, N. H., Hasan, M. R. M., Yusoff, N. I. M., Mohd, M. A., & Hussin, W. I. W. (2023). Performance of natural fiber modified asphalt mixtures: A review and future outlook. *Construction and Building Materials*, 368, 130489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130489>