

KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN STONE MASTIC ASPHALT DENGAN PENGGUNAAN FIBER MESH SEBAGAI BAHAN TAMBAH

Rani Bastari Alkam¹ dan Bulgis²

¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Jl. Urip Sumoharjo Km 05 Panaikang, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90231
¹rani.bastari@umi.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Jl. Urip Sumoharjo Km 05 Panaikang, Kec. Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90231
²bulgis.bulgis@umi.ac.id

Masuk: 12-01-2023, revisi: 13-08-2023, diterima untuk diterbitkan: 14-08-2023

ABSTRACT

Stabilizer additives are materials needed in a stone mastic asphalt (SMA) mixture to increase the cohesive properties of the materials. Fiber mesh additives have been tested on concrete mixtures, which are proven to improve mechanical performance but have yet to be tried on asphalt mixtures, especially SMA. This study analyzes the Marshall characteristics of the SMA mixture with fiber mesh as additives. Experimental tests in the laboratory were carried out to determine the Marshall parameters of the mixture containing fiber mesh varied by weight and length. The addition of fiber mesh can slightly increase density, decrease VIM and VMA, and increase VFA. With the addition of fiber mesh, the stability, and MQ values increase to the optimum limit and then decrease to a value smaller than that of samples without fiber mesh. The best content of fiber mesh is the length of 0,36 cm, as much as 0,3% of the total weight of the mixture, which can increase 6% the stability and Marshall coefficient of the sample without fiber mesh.

Keywords: stone mastic asphalt; Marshall characteristics; fiber mesh; stabilizer additives

ABSTRAK

Bahan tambah penstabil merupakan material yang dibutuhkan dalam komposisi campuran *stone mastic asphalt* yang berperan meningkatkan sifat kohesi antar material dalam campuran. Bahan tambah *fiber mesh* telah diuji pada campuran beton yang terbukti dapat meningkatkan kinerja mekanis beton namun belum dicobakan pada campuran beraspal khususnya SMA. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *Marshall* campuran SMA dengan *fiber mesh* sebagai bahan tambah. Pengujian eksperimental di laboratorium dilakukan untuk mengetahui parameter *Marshall* campuran yang ditambahkan *fiber mesh* dengan variasi kadar berat dan panjang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *fiber mesh* berpengaruh secara tidak signifikan terhadap karakteristik *Marshall* campuran yaitu meningkatkan density, menurunkan VIM dan VMA, dan meningkatkan nilai VFA. Dengan penambahan *fiber mesh*, nilai stabilitas dan MQ meningkat sampai pada batas optimum lalu kembali menurun hingga nilai yang lebih kecil dari nilai stabilitas dan MQ sampel tanpa *fiber mesh*. Kadar *fiber mesh* terbaik yaitu variasi panjang 0,36 cm sebanyak 0,3% dari total berat campuran yang mampu meningkatkan 6% nilai stabilitas dan koefisien *Marshall* sampel tanpa fiber mesh.

Kata kunci: *stone mastic asphalt*; karakteristik *Marshall*; *fiber mesh*; bahan tambah penstabil

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Di Indonesia, kerusakan jalan sering terjadi pada ruas jalan yang harus menanggung beban lalu lintas yang tinggi sebagai jalur pengangkutan barang oleh truk yang kelebihan muatan (Setiawan, 2020). Salah satu strategi jangka panjang dalam perancangan infrastruktur jalan adalah menyiapkan ruas jalan dengan kinerja yang tinggi pada jalur lalu lintas tinggi untuk menghemat biaya perbaikan dan mencegah kerugian akibat kerusakan dini pada lapisan perkerasan jalan (Department for Transport, 2020).

Stone Mastic Asphalt (SMA) adalah campuran aspal bergradasi senjang yang dirancang untuk memaksimalkan durabilitas dan ketahanan terhadap deformasi dari lapisan perkerasan jalan dengan mengandalkan struktur yang terbentuk dari ikatan antara agregat kasar (Jasni et al., 2020; Nur Syafiqah et al., 2021) Dibandingkan dengan campuran beton aspal yang lebih umum digunakan di Indonesia, SMA terbukti memiliki kinerja yang lebih baik dan cocok digunakan untuk jalan dengan beban lalu lintas yang tinggi (Talati & Talati, 2014). Tahapan perancangan SMA

terdiri dari pemilihan material, penentuan gradasi agregat optimum, pemilihan jenis dan jumlah bahan tambah, dan penentuan kadar aspal optimum (Irfan et al., 2019).

Bahan tambah penstabil diperlukan dalam campuran SMA untuk mencegah pengeringan aspal (*drain down*), meningkatkan kekuatan tarik dan sifat kohesi, dan menjamin homogenitas campuran aspal selama proses manufaktur, pengangkutan, dan penghamparan (Kumar & Shankar, 2020; Talati & Talati, 2014). Berbagai penelitian terdahulu telah mencoba menggunakan berbagai jenis bahan tambah mulai dari serat selulosa, serat mineral, polimer, material silika, dll yang terbukti meningkatkan kinerja campuran SMA (Kumar & Shankar, 2020; Talati & Talati, 2014; Yadykina et al., 2015)

Fiber Mesh adalah serat sintesis yang berbentuk anyaman kotak-kotak yang bersifat melekat (*self-adhesive*) yang biasanya berfungsi sebagai perkuatan dan perataan pada permukaan lapisan semen putih (acian putih), mencegah timbulnya retak pada bagian sambungan dan tepi sudut pertemuan dua bidang, mencegah terangkat akibat lembab maupun gerusan air hujan. Salah satu jenis fiber mesh yaitu *polypropylene fiber mesh* telah diuji pada campuran beton yang terbukti dapat meningkatkan kinerja mekanis beton (Khatri & Hinge, 2021). Mengingat pentingnya peran bahan aditif penstabil dalam komposisi campuran SMA, peneliti mencoba untuk menggunakan fiber mesh sebagai bahan tambah dalam pengujian kinerja campuran SMA.

Salah satu parameter yang merepresentasikan kinerja campuran beraspal adalah pengujian *Marshall*. Terdapat beberapa karakteristik *Marshall* yang diperoleh dari hasil pengujian Marshall yang menggambarkan properti mekanis dari campuran beraspal seperti stabilitas, kelelahan, kekakuan, dan rongga pada campuran (Loaiza & Colorado, 2018; Pria & Henri, 2019). Pemanfaatan *fiber mesh* sebagai bahan tambah penstabil dalam campuran SMA diharapkan dapat meningkatkan parameter *Marshall* dan mampu menjadi penguat (*reinforcement*) dalam campuran. Hal ini mengingat campuran SMA tanpa bahan tambah dapat memperlemah kekuatan tarik antar material yang tentu saja mengurangi stabilitas campuran. Karena itu diharapkan *fiber mesh* dapat menjadi bahan tambah alternatif yang mampu memenuhi persyaratan teknis untuk digunakan sebagai bahan perkerasan jalan. Dengan mengetahui karakteristik campuran SMA yang mengandung *fiber mesh* diharapkan dapat diketahui kelayakan *fiber mesh* untuk digunakan sebagai material alternatif dalam komposisi campuran beraspal, khususnya campuran SMA.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *Marshall* campuran SMA dengan menggunakan *fiber mesh* sebagai bahan tambah. Untuk mencapai tujuan tersebut maka pertama-tama perlu dianalisis pengaruh penambahan *fiber mesh* terhadap karakteristik *Marshall* pada campuran SMA lalu ditentukan kadar *fiber mesh* yang menghasilkan karakteristik *Marshall* optimum. Campuran SMA dirancang menggunakan gradasi SMA kasar yaitu gradasi nilai tengah sesuai dengan spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan Dirjen Bina Marga (Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2), 2019; Utami, 2018). Kadar *fiber mesh* divariasikan berdasarkan ketentuan kadar maksimum bahan aditif penstabil dalam campuran SMA yaitu sekitar 0,3% terhadap total campuran. Untuk memperoleh hasil penelitian yang lebih holistik, selain menurut berat, *fiber mesh* juga divariasikan menurut ukuran panjang.

Kajian teori

SMA adalah campuran bitumen yang terutama dicirikan oleh gradasi senjang yang membentuk kerangka agregat kasar yang menyediakan kontak antara partikel (kontak antara agregat) yang tidak ditemukan pada campuran padat konvensional dengan gradasi menerus (*Asphalt Concrete*). Selain itu, campuran agregat halus, *filler*, bitumen pengikat, dan aditif penstabil harus benar-benar memenuhi volume rongga udara yang tersisa dari agregat kasar untuk memastikan kohesi kerangka yang baik (Miranda et al., 2019).

Untuk menentukan kesesuaian sebuah bahan tambah untuk digunakan dalam campuran beraspal, karakteristiknya diuji dan dianalisis menggunakan instrumen *Marshall*. Hasil utama yang diperoleh langsung dari pengujian laboratorium adalah stabilitas dan nilai *flow*. Sementara parameter lain seperti VIM, VMA, VFA, dan MQ diperoleh dari perhitungan lebih lanjut (Putri et al., 2019).

Penggunaan *fiber mesh* sebagai bahan tambah pada penelitian terdahulu menunjukkan kontribusi positif dari penggunaan *fiber mesh* terhadap sifat mekanis beton yaitu menunjukkan hasil dengan kuat tekan beton yang optimum pada beton serat dengan dosis 0,60 kg/m³ pada umur 28 hari sebesar 29,17 MPa mengalami peningkatan sebesar 3,62% dari beton normalnya dan pada kuat tarik beton yang optimum pada beton serat dengan dosis 0,65 kg/m³ pada umur 28 hari sebesar 3,842 MPa atau mengalami peningkatan sebesar 20,44% dari beton normalnya.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian

Secara umum, penelitian ini berbasis eksperimen di Laboratorium. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia.

Variabel penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini yaitu kadar *fiber mesh* dan variabel terikat yaitu variabel yang merepresentasikan karakteristik *Marshall*. Sebelum dapat menganalisis setiap parameter *Marshall* terlebih dahulu perlu diketahui kadar aspal optimum dari campuran tanpa penambahan *fiber mesh* untuk selanjutnya dilakukan pengujian dengan beberapa variasi penambahan serat sehingga dapat diketahui pengaruhnya terhadap karakteristik *Marshall*.

Metode pengumpulan data

Pengujian tahap pertama adalah pengujian properti material agregat dan aspal dengan mengikuti persyaratan Spesifikasi Umum Jalan Tahun 2018. Aspal yang digunakan adalah aspal Pen 60/70. Setelah hasil pengujian memenuhi spesifikasi maka pengujian dapat dilanjutkan namun jika hasil yang diperoleh belum memenuhi spesifikasi maka dilakukan pengujian ulang. Langkah pengujian selanjutnya adalah penentuan komposisi campuran. Tahapan ini bertujuan untuk menentukan kadar aspal optimum dari variasi komposisi berat aspal yang diikuti dengan penyesuaian berat agregat. Kadar aspal optimum diperoleh dari analisis karakteristik campuran beraspal dengan meninjau beberapa parameter hasil pengujian Marshall tahap I yaitu VIM, VMA, VFB, *flow*, *stability*, dan *Marshall Quotient*. Tahapan ini diuji pada 15 briket aspal seperti yang dirincikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan jumlah sampel pengujian *Marshall* untuk penentuan kadar aspal optimum

Penentuan Kadar Aspal Optimum	
Kadar Aspal (%)	Jumlah Sampel
6	3
6,25	3
6,5	3
6,75	3
7	3
Total	15

Kadar aspal optimum selanjutnya dijadikan sebagai kadar aspal untuk seluruh variasi *fiber mesh*. Pengujian *Marshall* tahap II dilakukan pada briket yang mengandung *fiber mesh* dengan variasi kadar berat dan panjang yang ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan ketentuan kadar maksimum bahan aditif penstabil dalam campuran SMA yang tercantum pada spesifikasi umum Bina Marga Tahun 2018 yaitu sekitar 0,3% terhadap berat total campuran dengan panjang serat 3,6 mm, maka berikut ini adalah variasi kadar *fiber mesh* yang digunakan dalam eksperimen ini.

Tabel 2. Penentuan jumlah sampel pengujian *Marshall* untuk penentuan kadar *fiber mesh* optimum

Penentuan Kadar <i>Fiber Mesh</i> Optimum		
Kadar <i>Fiber Mesh</i> (Berat %)	Panjang <i>Fiber Mesh</i> (cm)	Jumlah Sampel
0,1	0,36	3
	0,72	3
	1,08	3
	1,44	3
	1,80	3
0,2	0,36	3
	0,72	3
	1,08	3
	1,44	3
	1,80	3
0,3	0,36	3
	0,72	3
	1,08	3
	1,44	3

Penentuan Kadar <i>Fiber Mesh</i> Optimum		
Kadar Fiber Mesh (Berat %)	Panjang <i>Fiber Mesh</i> (cm)	Jumlah Sampel
0,4	1,80	3
	0,36	3
	0,72	3
	1,08	3
	1,44	3
	1,80	3
Total		60

Untuk pengujian penentuan kadar *fiber mesh* optimum, digunakan nilai kadar aspal yang tetap yaitu kadar aspal optimum dari tahapan pengujian sebelumnya yang menjadi kontrol dalam percobaan penambahan *fiber mesh* dengan berbagai variasi. Dalam menentukan nilai variasi yang akan dicobakan, baik kadar aspal maupun variasi *fiber mesh* (menurut berat dan pajang) diambil patokan dari hasil penelitian terdahulu dan spesifikasi campuran SMA terkait rentang kadar aspal optimum untuk campuran SMA dan syarat penggunaan serat sebagai bahan tambah penstabil diperlukan dalam campuran SMA.

Metode analisis data

Data yang diperoleh dari pengujian *Marshall* adalah nilai stabilitas dan *flow*. Adapun untuk nilai parameter lainnya diperoleh dengan analisis lanjutan pada formula di *spreadsheet*. Langkah analisis selanjutnya adalah plot setiap nilai *Marshall* dengan diagram garis untuk mengecek interval nilai karakteristik *Marshall* yang masih memenuhi spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 untuk campuran SMA sehingga dapat ditentukan kadar *fiber mesh* optimum.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian properti material

Pada setiap material terlebih dahulu dilakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik dan kelayakan penggunaan material sebagai material campuran perkerasan jalan. Setiap material diuji dengan jenis pengujian yang berbeda berkaitan dengan fungsi dan peranan jenis material pada campuran perkerasan. Untuk menentukan apakah sebuah material layak digunakan atau tidak adalah dengan membandingkan data hasil pengujian dengan spesifikasi dari setiap pengujian.

Tabel 3. Hasil pengujian properti material agregat kasar dan halus

No	Jenis Pemeriksaan	Split			Abu Batu	Spesifikasi
		2-3	1-2	0,5- 1		
Analisis Saringan (%lolos)						
1.	25 (1")	100				100
	19,1 (3/4")	83,933	100			90-100
	12,7 (1/2")	27,467	67,384	100		50-88
	9,52 (3/8")	0,300	36,251	56,335		25-60
	No. 4	0	0,3	17,139	100	20-28
	No. 8	0	0	0,267	99,6	16-24
	No. 200	0	0	0	40,1	8-11
Berat Jenis Agregat						
2	a. Bulk	2,62	2,61	2,49	2,58	2,4 – 2,9
	b. SSD	2,67	2,67	2,56	2,73	2,4 – 2,9
	c. Apparent	2,73	2,73	2,68	2,49	2,4 – 2,9
	d. Penyerapan	2,13	2,2	2,88	2,89	≤ 3 %
Berat Isi						
3	a. Gembur (gr/cm ³)	1,47	1,43	1,42	1,52	1,4 – 1,9
	b. Padat (gr/cm ³)	1,56	1,53	1,51	1,68	1,4 – 1,9
4	Soundness Test #3/8" (%)	0,66	0,66	0,66	-	≤ 12 %
5	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal (%)	96	96	96	-	≥ 95 %
6	Sand Equivalent	-	-	-	79,74	≥ 60 %
7	Abration Test (%), 500 putaran		24,40	24,65	-	≤ 30

Berdasarkan Tabel 3 diketahui terdapat enam jenis pengujian yang dilakukan untuk agregat kasar dan empat pengujian untuk agregat halus (abu batu). Untuk pengujian analisis saringan agregat kasar digunakan spesifikasi gradasi SMA kasar yang tertera pada spesifikasi umum Bina Marga Tahun 2018. Terlihat bahwa karena campuran yang digunakan yaitu campuran SMA maka hanya digunakan agregat berukuran besar (batas lolos saringan no.8) yang ditambahkan dengan filler (abu batu yang lolos saringan nomor 200). Hasil analisis saringan ini kemudian menjadi dasar untuk penentuan komposisi agregat dalam pembuatan briket campuran SMA, karena itu spesifikasi interval yang ditunjukkan pada Tabel 3 baru akan dibandingkan kembali setelah penentuan komposisi agregat.

Adapun untuk pengujian lainnya diketahui bahwa seluruh hasil pengujian baik untuk agregat kasar maupun agregat halus dapat memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan untuk campuran SMA, artinya agregat kasar dan halus yang diuji layak dijadikan material penyusun campuran SMA. Selanjutnya dilakukan pengujian aspal sebagai material visco-elastis dalam campuran.

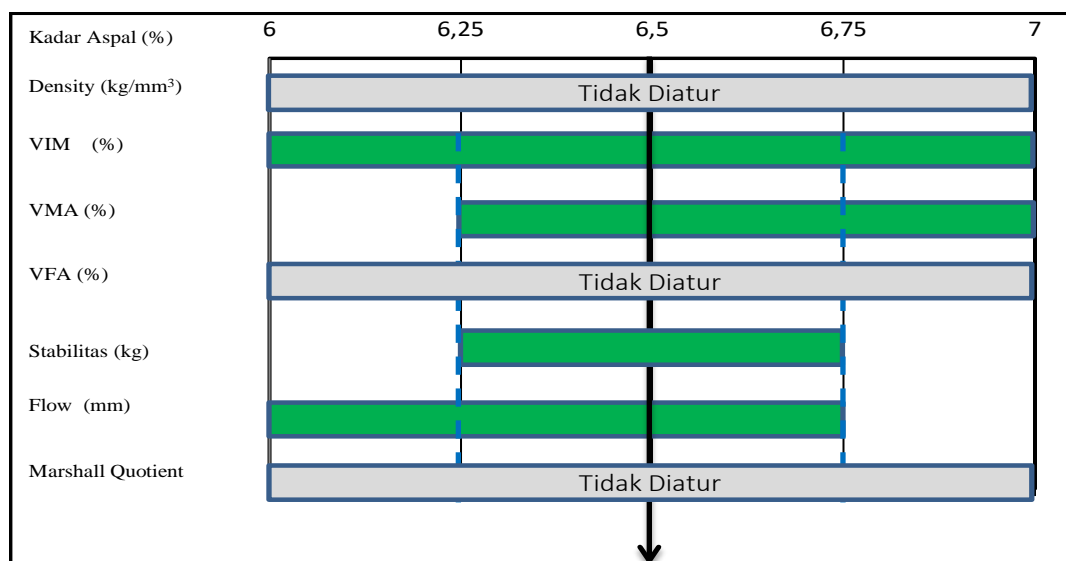
Tabel 4. Hasil pengujian properti material aspal

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pengujian		Rata-rata	Spesifikasi
		Sampel 1	Sampel 2		
1.	Penetrasi 25°C;100 gr; 5 detik; 0,1 mm	65,8	64,8	65,3	60 – 79
2.	Berat Jenis Aspal	0,995	1,084	1,040	≥ 1,0
3.	Titik Lembek Aspal (°C)	48	48	48	≥ 48
4.	Titik Nyala (°C)		270	270	≥ 232
5.	Titik Bakar Aspal (°C)		275	275	≥ 232
6.	Daktilitas, 25 °C; cm	144	145	144,5	≥ 100

Pada Tabel 4 ditunjukkan perbandingan hasil pengujian material aspal yang disiapkan dengan spesifikasi yang dipersyaratkan untuk aspal pen 60/70. Pengecekan ini diperlukan untuk memastikan bahwa material aspal yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai aspal penetrasi 60/70 sehingga karakteristik aspal tidak akan memberikan pengaruh buruk terhadap campuran beraspal. Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4 diketahui bahwa aspal yang digunakan layak menjadi bagian dari campuran SMA karena memenuhi persyaratan spesifikasi untuk setiap pengujian.

Hasil pengujian Marshall untuk penentuan kadar aspal optimum

Nilai kadar aspal yang memenuhi spesifikasi diinput pada diagram batang untuk selanjutnya dicari irisan interval kadar aspal yang memenuhi empat syarat parameter Marshall (VIM, VMA, stabilitas, dan Marshall Quotient). Untuk menentukan kadar aspal optimum maka diambil nilai tengah dari batas atas dan batas bawah irisan kadar aspal tersebut. Proses penentuan kadar aspal optimum ini ditunjukkan melalui gambar berikut.



Gambar 1. Penentuan kadar aspal optimum

Gambar 1 menunjukkan bahwa interval dari kadar aspal 6,25 hingga 6,75 adalah irisan pemenuhan spesifikasi karakteristik Marshall campuran SMA dalam hal ini diuji SMA gradasi kasar, karena itu nilai kadar aspal optimum yang diperoleh yaitu:

$$KAO = \frac{6,25+6,75}{2} = 6,5\%$$

Untuk tahapan selanjutnya, campuran sudah akan ditambahkan dengan *fiber mesh* dengan berbagai variasi baik berat maupun panjang, dengan nilai kadar aspal akan dikunci pada kadar 6,5%. Artinya seluruh campuran dibuat dengan berat aspal sebanyak 6,5% dari berat total campuran.

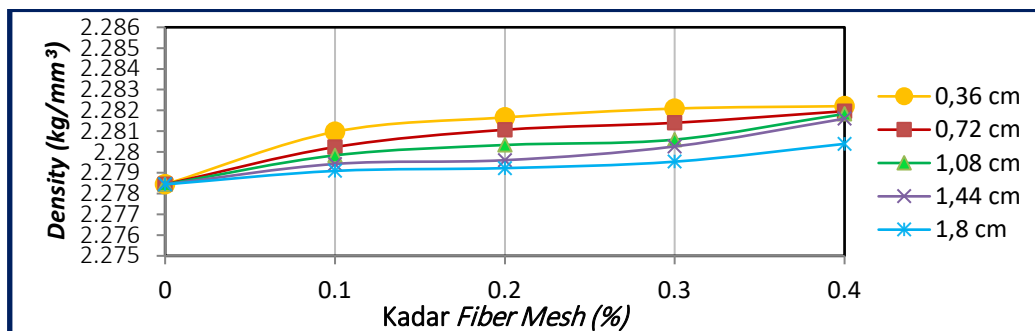
Analisis pengaruh penambahan *fiber mesh* terhadap karakteristik marshall pada campuran SMA

Tahapan ini merupakan tahapan inti penelitian. Pertama-tama dilakukan penentuan variasi *fiber mesh* berdasarkan hasil kajian literatur baik dari aspek panjang maupun berat. Dengan berat total campuran sebanyak 1200 gram dan peran *fiber mesh* sebagai bahan tambah dalam campuran maka pada Tabel 5 berikut ini diuraikan berat *fiber* dalam campuran dan pengaruhnya terhadap berat total campuran.

Tabel 5. Berat bahan tambah dan total campuran untuk setiap variasi *fiber mesh*

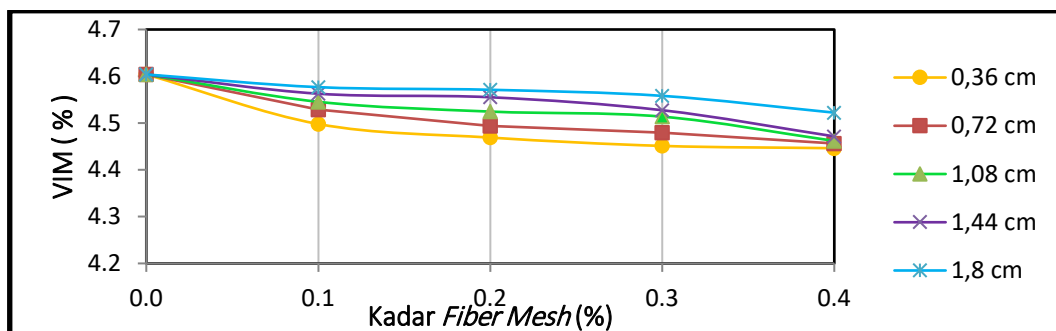
Variasi <i>fiber mesh</i> (%)	Berat bahan tambah (gram)	Berat total campuran (gram)
0	0	1200
0,1	1,2	1201,2
0,2	2,4	1202,4
0,3	3,6	1203,6
0,4	4,8	1204,8

Dengan proporsi aspal dan agregat yang tetap untuk seluruh sampel, pengaruh *fiber mesh* dalam campuran dapat diteliti dengan lebih terkontrol. Mengingat variasi ditinjau dari aspek berat dan panjang *fiber mesh*, maka grafik hasil pengujian sampel untuk setiap karakteristik *Marhsall* menyajikan hasil pengujian dengan kadar *fiber mesh* (menurut berat) sebagai absis, karakteristik *Marshall* sebagai ordinat, dan panjang *fiber* diwakili dengan garis dengan warna berbeda-beda.



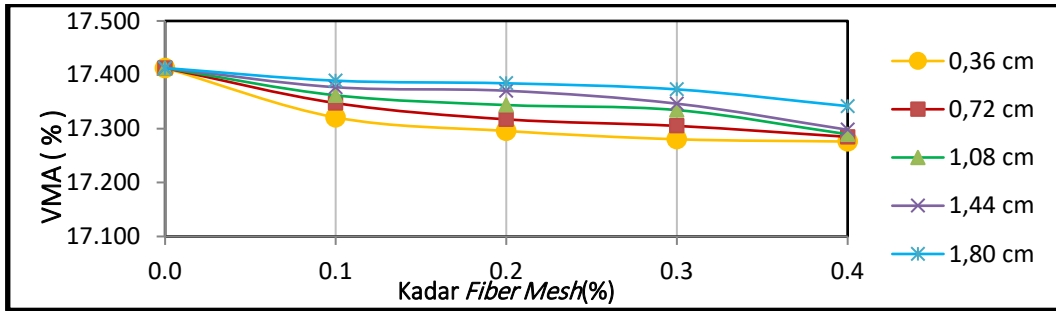
Gambar 2. Grafik nilai *density* untuk setiap kadar *fiber mesh*

Pada Gambar 2 diketahui bahwa nilai kepadatan sampel yang diuji tidak mengalami perubahan yang signifikan seiring dengan penambahan *fiber mesh*. Nilai *density* berkisar antara 2,278– 2,282 kg/mm³ dengan nilai minimum terjadi pada sampel tanpa *fiber mesh* dan nilai tertinggi terjadi pada kadar 0,4% panjang *fiber* 0,36 cm (kadar *fiber* terbanyak dan terpendek). Nilai kepadatan campuran meningkat seiring dengan penambahan kadar berat *fiber mesh* namun menurun seiring dengan penambahan panjang *fiber mesh* meskipun nilai penurunan yang terjadi tidak signifikan.



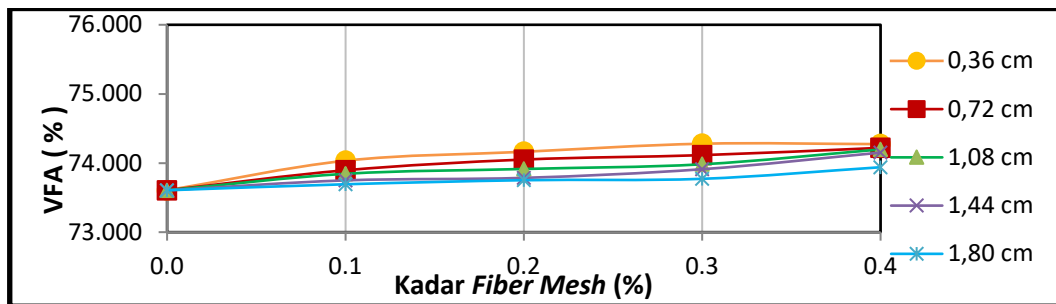
Gambar 3. Grafik nilai VIM untuk setiap kadar *fiber mesh*

Gambar 3. menyajikan hasil analisis kadar pori dalam campuran (VIM). Sama halnya dengan karakteristik kepadatan, perubahan nilai VIM, tidak terjadi secara signifikan. Nilai VIM berkisar antara nilai minimum 4,446% pada kadar *fiber mesh* 0,4% dengan panjang 0,36 cm dan nilai maksimum 4,604% yang terjadi pada briket tanpa penambahan *fiber mesh*. Secara konsisten, nilai VIM menurun seiring bertambahnya kadar berat *fiber mesh* dalam campuran. Dari grafik terlihat bahwa rentang nilai VIM tertinggi terjadi pada variasi *fiber mesh* terpanjang (1,8 cm) sedangkan interval nilai VIM terendah terjadi pada variasi panjang *fiber mesh* terpendek (0,36 cm). Selain itu, penurunan nilai VIM yang paling signifikan terjadi pada variasi panjang 0,36 cm yang menurun dari 4,604% hingga 4,446%.



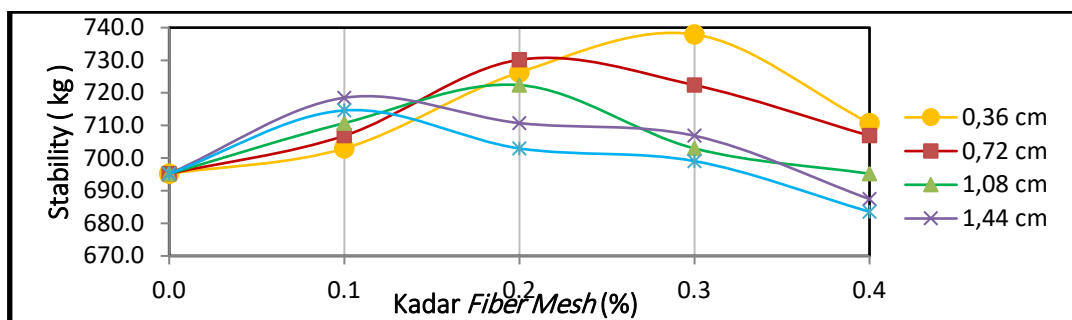
Gambar 4. Grafik nilai VMA untuk setiap kadar *fiber mesh*

Karakteristik *Marshall* lainnya yaitu kadar pori pada mineral agregat dalam campuran (VMA). Dari Gambar 4 diketahui bahwa penambahan kadar *fiber mesh* menyebabkan kecenderungan penurunan nilai VMA pada setiap variasi panjang agregat meskipun nilai penurunan yang terjadi tidak signifikan. Nilai VMA berkisar antara 17,276- 17,413% dengan nilai minimum terjadi pada kadar fiber mesh 0,4% panjang 0,36 cm dan nilai maksimum terjadi pada sampel tanpa *fiber mesh*. Selain itu, semakin panjang variasi *fiber mesh*, semakin tinggi kadar pori pada mineral agregat. Jika ditinjau secara seksama, tren nilai VMA ini sejalan dengan hubungan nilai VIM dan kadar fiber mesh.



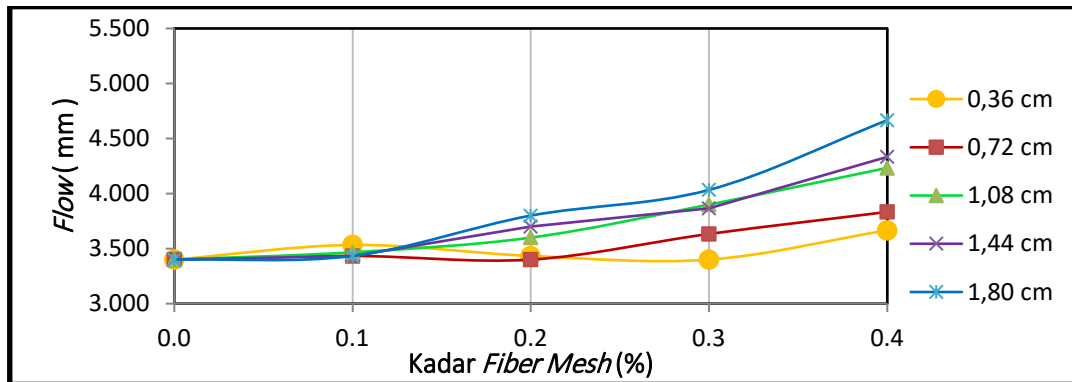
Gambar 5. Grafik nilai VFA untuk setiap kadar *fiber mesh*

Pada Gambar 5 ditunjukkan persentase pori dalam campuran yang terisi aspal seiring dengan penambahan kadar *fiber mesh*. Secara umum, tidak terjadi peningkatan persen VFA secara signifikan mengingat kadar aspal yang digunakan adalah konstan sebanyak 6,5% dari komposisi campuran. Namun merujuk pada hasil yang diperoleh, nilai VFA sedikit meningkat yang bermula dari nilai VFA sebesar 73,606% yang terjadi pada briket tanpa tambahan *fiber mesh* yang kemudian bertambah hingga nilai tertinggi sebesar 74,279% pada kadar fiber mesh 0,3% panjang 0,36 cm. Dari sudut pandang variasi panjang *fiber mesh* diketahui bahwa semakin panjang variasi *fiber mesh* yang digunakan semakin rendah nilai VFA. Hasil ini berbanding terbalik dengan tren nilai VIM dan VMA.



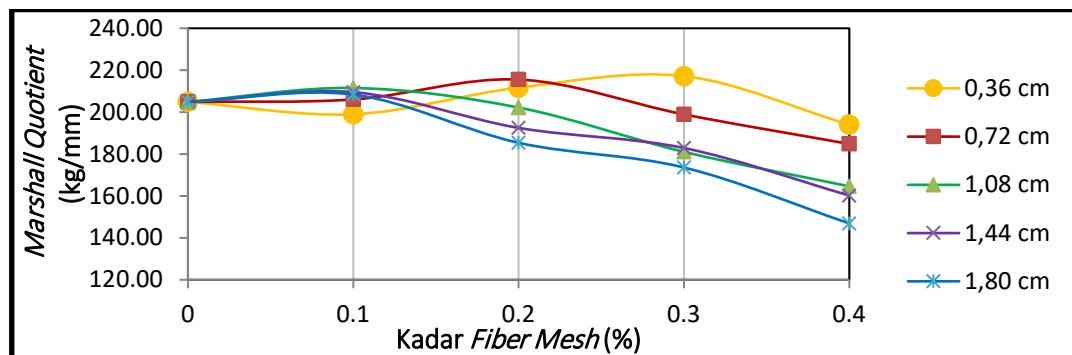
Gambar 6. Grafik nilai stabilitas untuk setiap kadar *fiber mesh*

Gambar 6 menunjukkan nilai stabilitas yaitu kekuatan campuran dalam menerima pembebanan tanpa mengalami perubahan bentuk. Dari grafik ini diketahui bahwa terdapat kecenderungan nilai stabilitas meningkat hingga kadar *fiber mesh* tertentu lalu menurun secara konsisten. Nilai stabilitas maksimum tercapai pada kadar *fiber mesh* 0,3% panjang 0,36 cm sebesar 737,916 kg sedangkan nilai stabilitas minimum sebesar 683,544 kg terjadi pada kadar *fiber mesh* 0,4% dengan panjang 1,8cm. Dari grafik diketahui bahwa untuk panjang *fiber mesh* 0,36 cm diperlukan 0,3% kadar fiber mesh untuk mencapai nilai stabilitas maksimum sebesar 737,916 kg. Untuk panjang fiber mesh 0,72 dan 1,08 cm dicapai nilai stabilitas maksimum berturut-turut sebesar 730,149 kg dan 722,381 kg yang terjadi pada kadar *fiber mesh* 0,20%. Sementara variasi panjang lainnya (1,44 dan 1,8 cm) tercapai pada kadar *fiber mesh* 0,1% dari total berat campuran. Artinya semakin pendek potongan *fiber mesh* yang digunakan, semakin banyak kadar berat *fiber mesh* yang diperlukan untuk mencapai nilai stabilitas maksimum.



Gambar 7. Grafik nilai *flow* untuk setiap kadar *fiber mesh*

Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa nilai *flow* secara konsisten meningkat untuk variasi panjang 1,08; 1,44; dan 1,80 cm seiring bertambahnya kadar *fiber mesh*. Sementara 0,72 cm, nilai *flow* meningkat di kadar 0,1% kemudian menurun di kadar 0,2% lalu secara konsisten meningkat hingga kadar 0,4%. Adapun untuk panjang *fiber mesh* 0,36 cm menunjukkan tren yang sama dimana mula-mula nilai *flow* meningkat di kadar *fiber* 0,1% lalu menurun hingga mencapai nilai minimum pada kadar 0,3% dan kembali meningkat pada kadar 0,4%. Meskipun nilai *flow* untuk dua kadar *fiber* terpendek fluktuatif, namun jangkauan nilai *flow* untuk kedua variasi ini lebih kecil artinya nilai *flow* yang dihasilkan lebih stabil dibandingkan dengan variasi panjang lainnya dimana nilai *flow* berubah dengan lebih signifikan ditunjukkan dengan garis grafik yang lebih tajam. Nilai *flow* mula-mula saat belum ditambahkan *fiber mesh* yaitu 3,40 mm yang selanjutnya meningkat hingga nilai paling tinggi 4,667 mm pada kadar *fiber mesh* 0,4% panjang 1,08 cm.



Gambar 8. Grafik nilai *Marshall Quotient* untuk setiap kadar *fiber mesh*

Pada Gambar 8. ditunjukkan nilai *Marshall Quotient* yang merupakan nilai perbandingan antara stabilitas dan *flow*. Nilai MQ berkisar antara 146,893- 217,159 kg/mm dengan nilai terendah terjadi pada kadar *fiber* 0,4% dengan panjang 1,8 cm sedangkan nilai tertinggi terjadi pada kadar fiber 0,3% panjang 0,36 mm. Jika ditinjau dari nilai MQ sampel tanpa *fiber mesh* sebesar 204,896 kg/mm, nilai MQ mengalami fluktuasi seiring dengan penambahan kadar *fiber mesh*. Tren yang terlihat dari grafik adalah untuk panjang fiber 0,36 cm mencapai nilai MQ maksimum pada kadar 0,3%, panjang 0,72 cm diperoleh MQ maksimum pada kadar 0,2%, sedangkan variasi panjang fiber tersisa (1,08; 1,44; dan 1,80) mengalami MQ maksimum pada kadar fiber 0,1%. Hasil ini dapat diinterpretasikan bahwa semakin panjang potongan *fiber mesh* dalam campuran, maka semakin sedikit jumlah *fiber mesh* yang dibutuhkan untuk mencapai nilai MQ optimum.

Selain itu dari grafik diketahui bahwa variasi *fiber* 0,36 cm menjadi satu-satunya variasi panjang yang menyebabkan penurunan nilai MQ pada kadar *fiber* 0,1%. Meskipun demikian, panjang *fiber* 0,36 dan 0,72 cm menyebabkan perubahan nilai MQ yang tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan variasi panjang lainnya. Hasil ini sebagai pengaruh dari tren yang sama pada nilai *flow* dimana diperoleh nilai *flow* yang paling stabil untuk dua kadar *fiber* terpendek. Variasi *fiber* terpanjang menyebabkan perubahan nilai MQ yang paling signifikan dibandingkan dengan variasi panjang lainnya.

Analisis kadar *fiber mesh* yang menghasilkan karakteristik *Marshall* optimum

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* dan analisis pengaruh penambahan *fiber mesh* terhadap karakteristik *Marshall* campuran SMA, pada tahapan ini dipetakan variasi *fiber mesh* yang sesuai dengan persyaratan campuran SMA dari standar Bina Marga. Berangkat dari persyaratan tersebut selanjutnya dipetakan pemenuhan spesifikasi untuk setiap variasi panjang *fiber mesh*. Setelah itu, ditentukan satu variasi kadar *fiber mesh* yang terbaik berdasarkan pemenuhan terhadap spesifikasi dan nilai optimum pada parameter yang menunjukkan kinerja campuran terbaik. Parameter *Marshall* dengan persyaratan yang belum diatur dalam spesifikasi Bina Marga, tidak menjadi pertimbangan dalam penentuan variasi *fiber* optimum.

Kadar Fiber (%)	0	0,1	0,2	0,3	0,4
Density (kg/mm ³)	Tidak Diatur				
VIM (%)	[Green Bar]				
VMA (%)	[Green Bar]				
VFA (%)	Tidak Diatur				
Stabilitas (kg)	[Green Bar]				
Flow (mm)	[Green Bar]				
Marshall Quotient	Tidak Diatur				

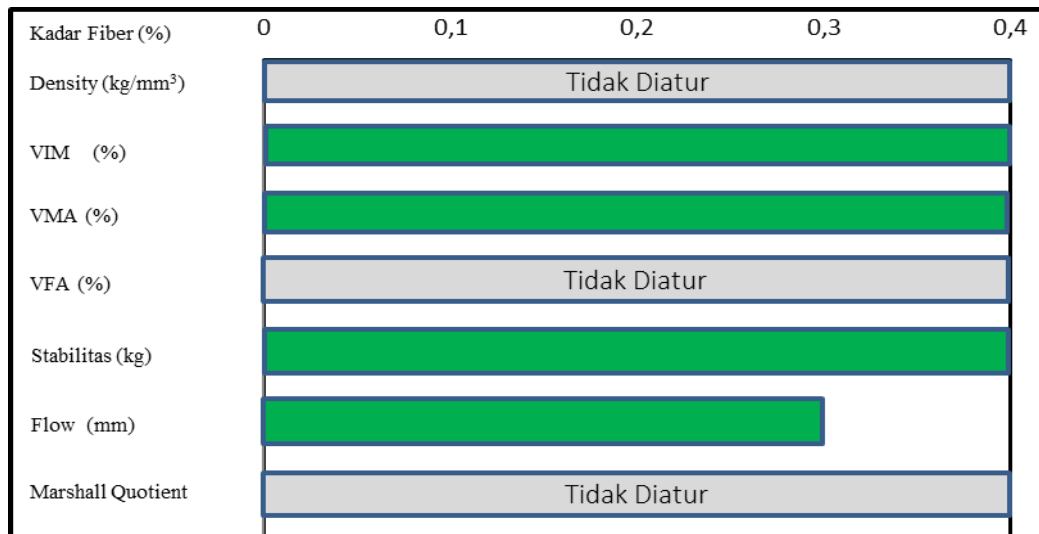
Gambar 9. Perbandingan hasil pengujian *Marshall* sampel dengan variasi panjang 0,36; 0,72; 1,08; 1,44 cm dengan spesifikasi campuran SMA

Untuk potongan *fiber mesh* sepanjang 0,36 cm, hasil pengujian memenuhi spesifikasi VIM, VMA, stabilitas, dan *flow*. Nilai VIM yang berkisar antara 4,446-4,604% masuk dalam interval spesifikasi 4-5%. Nilai VMA yang berkisar antara 17,276-17,413% memenuhi persyaratan nilai VMA minimal 17%. Begitu pula untuk nilai *flow* sebesar 3,400-3,667 mm juga masih masuk dalam rentang spesifikasi 2-4,5 mm. Dari campuran yang mengandung *fiber mesh* panjang 0,36 cm, seluruhnya memenuhi spesifikasi nilai stabilitas minimal 600 kg karena nilai stabilitas yang diperoleh berkisar antara 695,195-737,916 kg.

Untuk panjang *fiber mesh* 0,72 cm diperoleh nilai VIM, VMA, stabilitas dan *flow* untuk seluruh kadar berat *fiber* memenuhi spesifikasi Bina Marga. Nilai VIM yang berkisar antara 4,456-4,604% masuk dalam interval spesifikasi 4-5%. Nilai VMA yang berkisar antara 17,285-17,413% memenuhi persyaratan minimal 17%. Begitu pula untuk nilai *flow* sebesar 3,400-3,833 mm juga masih masuk dalam rentang spesifikasi 2-4,5 mm. Nilai stabilitas untuk variasi sampel ini hanya berkisar 695,195- 730,149 kg yang keseluruhannya memenuhi batas stabilitas minimal campuran SMA yaitu 600 kg.

Sejalan dengan dua variasi panjang sebelumnya, untuk *fiber mesh* sepanjang 1,08 cm, empat parameter *Marshall* memenuhi nilai spesifikasi di setiap kadar berat *fiber mesh* yaitu nilai VIM, VMA, stabilitas dan *flow*. Nilai VIM berada dalam rentang 4,462-4,604% yang memenuhi spesifikasi 4-5%, sedangkan nilai VMA berkisar antara 17,290-17,413% memenuhi syarat nilai VMA minimal 17%. Begitu pula untuk nilai *flow* yang meningkat dari nilai 3,4- 4,233 mm yang semuanya berada dalam interval spesifikasi 2-4,5 mm. Sejalan dengan hasil yang diperoleh dari variasi *fiber* terpendek, syarat nilai stabilitas terpenuhi di seluruh kadar berat *fiber mesh* yaitu dicapai nilai 695,195- 722,381 kg.

Dengan panjang 4x lipat dari panjang mula-mula (0,36 cm), nilai parameter *Marshall* untuk panjang 1,44 cm, parameter stabilitas memenuhi persyaratan minimal 600 kg karena nilai yang diperoleh berkisar antara 687,428 – 714,614 kg. Adapun untuk nilai VIM fluktuatif pada kisaran 4,472-4,604% berada dalam rentang spesifikasi 4-5%, nilai VMA 17,298-17,413% lebih besar dari nilai minimal yang diatur yaitu 17%, dan nilai *flow* berkisar antara 3,400-4,333 mm dimana keseluruhan nilai ini masih dalam batas yang disyaratkan yaitu 2-4,5 mm.



Gambar 10. Perbandingan hasil pengujian *Marshall* sampel dengan variasi panjang 1,8 cm dengan spesifikasi campuran SMA

Berbeda dengan variasi panjang lainnya, untuk variasi panjang yang terakhir yaitu 1,8 cm, hanya tiga parameter dengan nilai yang memenuhi spesifikasi di setiap kadar berat, yaitu nilai VIM, VMA, dan stabilitas. Nilai VIM yang secara konsisten menurun mulai dari 4,604% untuk sampel tanpa *fiber* hingga 4,522% pada kadar 0,4%, seluruhnya masuk dalam interval syarat yaitu 4-5%. Untuk nilai VMA semua nilai lebih besar dari 17% (17,342-17,413%). Begitupula untuk nilai stabilitas dimana setiap kadar berat *fiber* yang menghasilkan nilai stabilitas yang lebih besar dari standar minimal 600 kg (683,5436 -714,6137 kg). Namun, syarat nilai *flow* tidak dipenuhi pada kadar *fiber mesh* 0,4% karena diperoleh hasil sebesar 4,667 mm sementara persyaratan parameter *flow* untuk campuran SMA yaitu 2-4,5 mm.

Pembahasan

Setelah dilakukan pengolahan data dan interpretasi hasil pengujian yang diperoleh, selanjutnya hasil tersebut akan dibahas sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, sebagai berikut:

1) Pengaruh penambahan *fiber mesh* terhadap karakteristik *Marshall* pada campuran SMA

a) Pengaruh *fiber mesh* terhadap *density* pada campuran aspal

Penambahan *fiber mesh* menghasilkan nilai *density* yang meningkat secara tidak signifikan. Nilai *density* yang relatif konstan ini berkaitan dengan kadar aspal yang konstan sehingga berat setiap sampel hanya mengalami sedikit penambahan dari penambahan *fiber mesh* dalam jumlah yang kecil sementara volume briket tetap sesuai dengan volume dari cetakan yang digunakan. Artinya, peningkatan kepadatan campuran lebih dipengaruhi oleh berat *fiber mesh* dalam campuran. Adapun untuk panjang *fiber mesh* dengan interval nilai *density* tertinggi terjadi pada potongan *fiber* terpendek (0,36 cm) sedangkan interval terendah terjadi pada panjang 1,8 cm. Hasil ini dimaknai bahwa potongan *fiber* yang lebih kecil lebih mampu mengisi rongga dalam campuran sehingga kepadatan campuran bisa lebih ditingkatkan meskipun dampak yang ditimbulkan terjadi tidak terlalu berbeda jauh antar setiap panjang *fiber*.

b) Pengaruh *fiber mesh* terhadap VIM pada Campuran Aspal

Nilai VIM semakin menurun seiring dengan penambahan kadar *fiber mesh*. Hal ini terjadi karena keberadaan lebih banyak jumlah *fiber* mampu mengisi lebih banyak rongga dalam campuran. Penurunan proporsi rongga yang terjadi tidak signifikan berkaitan dengan penambahan *fiber mesh* dalam jumlah yang kecil. Dengan semakin rendahnya nilai VIM maka semakin kecil pula rongga dalam campuran yang artinya campuran semakin baik. Namun demikian, penambahan *fiber mesh* dalam jumlah yang terlalu besar akan menyebabkan nilai VIM yang terlalu kecil yang dapat menyebabkan rongga dalam campuran tidak cukup menampung aspal akibat pematatan lanjutan dari beban lalu lintas dan berdampak buruk untuk kinerja perkerasan. Ditinjau dari variasi panjang *fiber mesh*, 0,36 cm merupakan variasi yang memberikan pengaruh penurunan nilai VIM yang paling signifikan sementara variasi 1,8cm tidak memberikan pengaruh penurunan yang signifikan. Hal ini disinyair terjadi karena potongan *fiber mesh* yang lebih pendek lebih mampu mengisi rongga yang kecil dalam campuran.

c) Pengaruh *fiber mesh* terhadap VMA pada Campuran Aspal

Nilai VMA semakin menurun seiring dengan penambahan kadar *fiber mesh*. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan *fiber mesh* sebagai bahan tambah pada campuran mampu mengisi rongga antar agregat pada campuran. Semakin

banyak potongan *fiber* yang mengisi rongga antar agregat semakin tinggi berat jenis bulk campuran sebagai akibat dari berkurangnya volume rongga pada campuran tersebut. Sejalan dengan tren yang terjadi pada parameter VIM, variasi *fiber mesh* terpanjang hanya sedikit menurunkan kadar pori pada agregat mineral, sedangkan variasi terpendek menyebabkan penurunan nilai VMA yang paling signifikan. Hal ini sejalan dengan fakta bahwa variasi *fiber mesh* yang lebih pendek akan menghasilkan potongan yang lebih banyak untuk mencapai berat yang sama dengan potongan *fiber* yang lebih panjang. Kuantitas potongan yang lebih banyak ini lebih berpeluang untuk mengisi pori antar agregat dalam campuran jika dibandingkan dengan potongan yang panjang namun dalam jumlah yang lebih sedikit.

d) Pengaruh *fiber mesh* terhadap VFA pada campuran aspal

Nilai VFA meningkat secara tidak signifikan seiring dengan penambahan *fiber mesh*. Hal ini terjadi karena kadar aspal yang digunakan untuk setiap variasi campuran adalah konstan pada kadar 6,5% artinya jumlah aspal yang mampu mengisi pori adalah sama yaitu sebanyak 78 gram dari total 1200 gram campuran. Adapun peningkatan yang tidak signifikan pada nilai VFA terjadi karena keberadaan *fiber* yang divariasikan semakin banyak dalam campuran sehingga mampu mengisi rongga dan mempermudah aspal untuk mengisi rongga yang tersisa yang menyebabkan persentase nilai VFA meningkat meskipun tidak signifikan. Dari aspek pengaruh panjang *fiber mesh*, diperoleh dampak yang berbanding terbalik dengan hasil parameter VIM dimana untuk parameter VFA, campuran dengan kadar 0,36 cm mampu meningkatkan nilai VFA dengan lebih signifikan dibandingkan kadar terpanjang 1,8 cm. Hal ini sejalan dengan efek *fiber mesh* terpendek (0,36 cm) yang mampu menurunkan nilai VIM dengan lebih signifikan dibandingkan dengan panjang lainnya yang memudahkan material aspal untuk mengisi kadar pori yang masih kosong.

e) Pengaruh *fiber mesh* terhadap stabilitas pada campuran aspal

Dengan penambahan *fiber mesh*, nilai stabilitas mengalami kenaikan sampai pada batas optimum lalu kembali menurun bahkan hingga nilai yang lebih kecil dari nilai stabilitas sampel tanpa *fiber mesh*. Hasil ini menggambarkan bahwa jumlah *fiber mesh* yang terlalu besar berdampak kurang baik bagi kinerja campuran karena menyebabkan daya ikat dari lapisan aspal sudah tidak efektif untuk penguncian antar partikel sehingga terjadi gesekan antar butir yang lebih jauh menyebabkan penurunan kekuatan campuran untuk menanggung beban lalu lintas. Perilaku ini juga tergambar dari nilai optimum yang tercapai pada kadar berat yang semakin kecil untuk *fiber mesh* yang lebih panjang dimana sifat saling mengunci (*interlocking*) antar aspal dan agregat lebih terbantu jika potongan fiber lebih pendek dan dalam kadar berat yang optimum. Selain itu, jika *fiber mesh* semakin panjang (1,08, 1,44, dan 1,80 cm) menyebabkan penurunan nilai stabilitas yang lebih tajam dibandingkan dengan kadar *fiber mesh* dengan ukuran yang lebih pendek (0,36 cm dan 0,72 cm). Artinya keberadaan *fiber mesh* dengan potongan yang panjang dapat menghalangi sifat kohesi antar partikel agregat dan sifat adhesi antara agregat dan aspal yang akhirnya mengurangi ikatan antar material dalam campuran dan mengakibatkan campuran menjadi lemah dalam menerima beban lalu lintas sehingga beban maksimum yang dapat ditanggung sebelum mengalami perubahan bentuk menjadi lebih rendah.

f) Pengaruh *fiber mesh* terhadap *flow* pada campuran aspal

Peningkatan nilai *flow* yang terjadi secara konsisten pada *fiber mesh* yang lebih panjang (1,08 cm; 1,44 cm, dan 1,80 cm) sering dengan penambahan berat *fiber mesh* menggambarkan ketidakmampuan campuran untuk bertahan akan perubahan bentuk akibat pembebanan tertentu jika kadar *fiber mesh* terlalu panjang dan terlalu banyak. Untuk *fiber* yang berukuran paling panjang (1,8 cm) menyebabkan peningkatan nilai *flow* yang paling signifikan dibanding variasi panjang lainnya yang artinya keberadaan *fiber mesh* dengan potongan yang panjang dalam campuran menyebabkan besarnya kelelahan yang terjadi pada campuran sehingga mengalami perubahan bentuk yang lebih besar dibanding variasi panjang lainnya. Hasil ini sejalan dengan sifat *fiber mesh* yang cenderung elastis dan mudah mengalami perubahan bentuk utamanya jika dalam ukuran yang relatif panjang. Sementara itu, tren nilai *flow* yang fluktuatif namun tidak berubah secara signifikan pada potongan *fiber* yang lebih pendek (0,36 dan 0,72 cm) menunjukkan bahwa campuran masih lebih kebal akan perubahan bentuk jika ditambahkan fiber mesh yang berukuran pendek. Dengan kata lain campuran masih memiliki kemampuan untuk bertahan terhadap terjadinya deformasi akibat beban lalu lintas jika kadar berat dan ukuran panjang *fiber mesh* masih dalam nilai yang kecil.

g) Pengaruh *fiber mesh* terhadap *marshall quotient* pada campuran aspal

Marshall Quotient adalah nilai perbandingan antara nilai stabilitas yang dikoreksi terhadap nilai kelelahan (*flow*) yang menunjukkan kekuatan suatu campuran beraspal dalam menerima beban dalam kg/mm. Nilai MQ tertinggi terjadi pada variasi panjang fiber 0,36 cm dengan kadar berat 0,3% lalu menurun jika kadar *fiber mesh* ditambahkan lebih dari 0,3%. Selain itu, pergeseran pencapaian nilai MQ optimum ke kadar berat yang lebih rendah seiring dengan penambahan *fiber mesh* bermakna campuran membutuhkan lebih sedikit jumlah *fiber* jika berukuran panjang untuk dapat menerima beban yang lebih besar tiap mm perubahan bentuk yang terjadi. Penurunan nilai MQ yang lebih drastis pada *fiber mesh* yang berukuran lebih panjang menunjukkan sensitivitas campuran dengan keberadaan fiber mesh yang berukuran panjang sejalan dengan stabilitas yang kecil dan *flow* yang lebih besar. Secara umum, penambahan *fiber mesh* dalam jumlah dan panjang yang tepat mampu meningkatkan nilai MQ dari nilai mula-mula pada sampel yang tidak mengandung *fiber mesh*, artinya jika ditambahkan dengan kadar yang sesuai, nilai MQ dapat ditingkatkan yang artinya kekuatan campuran beraspal dalam menerima beban dapat ditingkatkan.

2) Kadar *Fiber Mesh* yang Menghasilkan Karakteristik Marshall Optimum

Pada bagian ini akan dibahas kadar *fiber mesh* yang paling optimum dalam meningkatkan kinerja campuran beraspal berdasarkan pengaruhnya terhadap karakteristik *Marshall* dan pemenuhan persyaratan campuran SMA menurut spesifikasi Bina Marga Tahun 2018. Ditinjau dari hasil yang ditunjukkan pada Gambar 9 hingga 10, *fiber mesh* mampu memperbaiki karakteristik *Marshall* dari hasil perbandingan terhadap sampel tanpa *fiber mesh*, sehingga perlu ditentukan kadar *fiber mesh* terbaik di antara seluruh variasi sampel yang diuji untuk memudahkan pengujian lanjutan dalam menilai perilaku campuran beraspal dengan penggunaan *fiber mesh* sebagai bahan tambah.

Ditinjau dari aspek panjang *fiber mesh*, semakin pendek ukuran *fiber mesh*, semakin baik parameter volumetrik campuran yang dihasilkan dimana dengan penambahan *fiber mesh* panjang 0,36 cm dihasilkan nilai *density* tertinggi, nilai VIM dan VMA terendah, serta nilai VFA tertinggi dengan nilai VIM dan VMA yang memenuhi spesifikasi campuran SMA pada seluruh kadar berat *fiber* yang dicobakan. Sementara itu, variasi *fiber mesh* terpanjang (1,8 cm) mampu meningkatkan *flow* hingga ke nilai yang tidak memenuhi spesifikasi yaitu 4,667 mm (spesifikasi 2-4,5 mm).

Begitupula dengan hasil analisis perilaku campuran dalam menerima pembebanan lalu lintas dimana penambahan *fiber mesh* panjang 0,36 cm pada kadar berat tertentu (0,3%) mampu meningkatkan nilai stabilitas dan koefisien *Marshall* campuran sekitar 6% lebih tinggi dari nilai stabilitas dan koefisien *Marshall* sampel tanpa *fiber mesh*. Dalam hal ini, nilai stabilitas meningkat dari nilai mula-mula 695,195 kg menjadi 737,916 kg setelah penambahan 0,3% kadar *fiber mesh* ukuran 0,36 cm. Begitu pula dengan nilai MQ yang meningkat dari 204,896 kg/mm hingga 217,159 kg/mm. Adapun untuk nilai *flow* diperoleh nilai yang terendah pada variasi sampel 0,36 cm sebanyak 0,3%.

Ditinjau lebih jauh berdasarkan kadar berat *fiber mesh* pada sampel sepanjang 0,36 cm diketahui bahwa dari parameter volumetrik, diperoleh nilai optimum pada kadar berat 0,4% (nilai *density* tertinggi, VIM dan VMA terendah) dan kadar 0,3% untuk nilai VFA tertinggi. Namun demikian, jika dibandingkan dari perilaku sampel saat menerima pembebanan tertentu, pada variasi kadar 0,4%, nilai stabilitas menurun dan nilai *flow* meningkat yang mengakibatkan penurunan nilai MQ secara signifikan. Artinya dapat ditentukan bahwa dari segala parameter *Marshall* yang diuji dapat dihasilkan nilai optimum pada kadar berat 0,3% dengan panjang *fiber mesh* 0,36 cm.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan di bagian sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Penambahan *fiber mesh* pada campuran SMA berpengaruh secara tidak signifikan terhadap karakteristik *Marshall* yaitu meningkatkan *density*, menurunkan VIM dan VMA, dan meningkatkan VFA. Penambahan *fiber mesh* menyebabkan nilai stabilitas dan MQ meningkat sampai pada batas optimum lalu kembali menurun bahkan sampai nilai yang lebih kecil dari nilai stabilitas dan MQ sampel tanpa *fiber mesh*. Khusus untuk nilai *flow*, secara umum keberadaan *fiber mesh* dalam campuran SMA menyebabkan peningkatan nilai *flow*.
- 2) Kadar *fiber mesh* terbaik di antara seluruh variasi sampel yang diuji yaitu *fiber mesh* panjang 0,36 cm dengan kadar berat 0,3% yang mampu meningkatkan 6% nilai stabilitas dan koefisien *Marshall* sampel tanpa *fiber mesh*.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh serta proses penelitian yang telah dilalui peneliti, diusulkan beberapa saran sebagai berikut:

- 1) Penelitian lanjutan dapat mencoba menganalisis pengaruh *fiber mesh* sebagai material substitusi dalam campuran atau sebagai bahan tambah untuk pengujian yang berbeda seperti pengujian *wheel tracking* ataupun SEM.
- 2) Penelitian lainnya dapat berfokus pada pengujian yang belum dilakukan dalam penelitian ini seperti pengujian *draindown* dengan variasi kadar yang berbeda.
- 3) Disarankan untuk mempertimbangkan nilai berat jenis *fiber mesh* dalam perhitungan berat jenis campuran utamanya jika kadar *fiber mesh* yang digunakan dalam jumlah yang besar.
- 4) Keandalan alat pengujian di laboratorium sangat diperlukan untuk memperoleh hasil pengujian yang akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Department for Transport. (2020). *Road Investment Strategy 2: 2020 – 2025* (Issue March). https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/872252/road-investment-strategy-2-2020-2025.pdf
- Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2), Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2019).

- Irfan, M., Ali, Y., Ahmed, S., Iqbal, S., & Wang, H. (2019). Rutting and Fatigue Properties of Cellulose Fiber-Added Stone Mastic Asphalt Concrete Mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2019/5604197>
- Jasni, N. E., Masri, K. A., Ramadhansyah, P. J., Arshad, A. K., Shaffie, E., Ahmad, J., & Norhidayah, A. H. (2020). Mechanical Performance of Stone Mastic Asphalt Incorporating Steel Fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 712(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012026>
- Khatri, A. P., & Hinge, G. A. (2021). Comparative study of confining reinforcement used for the rectangular concrete short column. *Materials Today: Proceedings*, 49(xxxx), 1844–1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.055>
- Kumar, G. S., & Shankar, A. U. R. (2020). Evaluation of Workability and Mechanical Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures Made with and without Stabilizing Additives (Transportation Infrastructure Geotechnology, (2020), 7, 2, (191-204), 10.1007/s40515-019-00098-3). *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7(2), 205. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00101-x>
- Loaiza, A., & Colorado, H. A. (2018). Marshall stability and flow tests for asphalt concrete containing electric arc furnace dust waste with high ZnO contents from the steel making process. *Construction and Building Materials*, 166, 769–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.012>
- Miranda, H. M. B., Batista, F. A., Lurdes Antunes, M. de, & Neves, J. (2019). A new SMA mix design approach for optimisation of stone-on-stone effect. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup1), S462–S479. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1588779>
- Nur Syafiqah, S. M. Z., Masri, K. A., Jasni, N. E., & Hasan, M. (2021). Performance of Stone Mastic Asphalt incorporating Kenaf fiber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 641(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/641/1/012001>
- Pria, R. C., & Henri, S. (2019). Marshall characteristics of asphalt concrete wearing course using crumb rubber modified of motorcycle tire waste as additive. *Materials Science Forum*, 961 MSF(50), 57–61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.961.57>
- Putri, E. E., Idral, M., Makinda, J., & Gungat, L. (2019). Marshall properties of porous asphalt with gondorukem rubber addition. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(1), 167–180.
- Setiawan, D. (2020). Overloading Vehicle Impact Analysis on the Performance of Toll Road Traffic. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4828–4833. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/121882020>
- Talati, A., & Talati, V. (2014). Study of Stone Matrix Asphalt For The Flexible Pavement. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(1), 789–792. www.ijedr.org
- Utami, P. D. (2018). Perancangan Laboratorium Campuran Stone Matrix Asphalt (Sma) Menggunakan Aspal Shell Pen 60/70 Dan Aspal Modifikasi Elvaloy. In *Departmen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta*.
- Yadykina, V., Tobolenko, S., Trautvain, A., & Zhukova, A. (2015). The influence of stabilizing additives on physical and mechanical properties of stone mastic asphalt concrete. *Procedia Engineering*, 117(1), 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.181>

