

Artikel Penelitian (Teknik Sipil)

Pengaruh Penambahan *Silica Fume* terhadap Karakteristik Campuran *Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*

Adina Sari Lubis, Zulkarnain Abdul Muis, Ridwan Anas, Andy Putra Rambe, Citra Aditya Sarah

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 26 Desember 2023

Revisi Akhir: 15 Januari 2024

Diterbitkan Online: 20 Januari 2024

KATA KUNCI

Silica Fume; *Marshall Test*; Metode Refluks;
Wheel Tracking Machine Test;
Stabilitas Dinamis

KORESPONDENSI

Phone: +62 822-9694-0932

E-mail: adina@usu.ac.id

A B S T R A K

Bahan aditif sebagai bahan yang ditambahkan pada campuran aspal bertujuan untuk meningkatkan mutu campuran aspal serta meningkatkan kekerasan dan kekuatan perkerasan jalan terutama yang sering dilalui kendaraan berat. Beberapa jenis bahan tambahan yang dapat dicampurkan ke dalam aspal antara lain kapur, plastik, dan karet. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *silica fume* terhadap karakteristik campuran *Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*. *Silica fume* yang ditambahkan pada campuran aspal mempunyai variasi kadar 2%, 4%, 5%, 6%, dan 8% dari kadar aspal. Benda uji penelitian sebanyak 92 buah yang terdiri dari 36 benda uji Marshall Test sebelum Kadar Aspal Optimum (OAC), 54 benda uji Marshall Test setelah OAC dan 2 benda uji *Wheel Tracking Machine (WTM) Test*. Pada penelitian ini juga dilaksanakan pengujian ekstraksi Metode Refluks untuk membuktikan adanya kesesuaian antara gradasi agregat yang dipakai sebelum dan sesudah Marshall Test. Dari hasil Uji Marshall diketahui bahwa penambahan *silica fume* dengan kadar 5% pada campuran aspal menghasilkan karakteristik yang paling baik diantara tingkat variasi lainnya yang memenuhi Spesifikasi Bina Marga Revisi III tahun 2010. Dari hasil pengujian *WTM* dengan penambahan kadar *silica fume* sebesar 5% pada campuran aspal menunjukkan kecepatan deformasi total yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa campuran aspal mempunyai ketahanan deformasi yang lebih tinggi dibandingkan tanpa penambahan *silica fume*.

PENDAHULUAN

Aditif sebagai bahan yang ditambahkan ke dalam campuran aspal bertujuan untuk memperbaiki kualitas campuran aspal serta meningkatkan kekerasan dan kekuatan perkerasan jalan terutama yang sering dilalui kendaraan berat [1]. Beberapa jenis aditif yang telah dicampurkan ke dalam aspal antara lain, kapur, plastik, *crumb rubber* dan *silica fume* [2], [3]. *Silica fume* atau disebut juga dengan *micro-silica* merupakan hasil produk sampingan pada proses pembuatan *silicon* atau *ferro-silicon alloy* menggunakan kuarsa silika dan batubara di dalam tanur listrik tinggi [4]. Penambahan *silica fume* pada lapisan AC-WC sebagai bahan aditif memiliki beberapa keunggulan yang dapat mengoptimalkan sifat campuran, seperti stabilitas, flow, meningkatkan kuat tarik, kuat tekan langsung dan mengurangi potensi kedalaman rutting [4], [5]

Penelitian mengenai pengaruh penambahan *silica fume* terhadap campuran aspal sudah ada dilakukan pada lapisan AC-BC. Penelitian oleh C. Kai dkk (2018) menyimpulkan bahwa seiring dengan bertambahnya kandungan *silica fume* pada aspal yang dimodifikasi dengan kompon karet jenis *SBS (Styrene-Butadiene-Styrene)*, maka kinerja campuran aspal pada suhu tinggi akan meningkat secara signifikan, dan yang terbaik ketika kadar *silica fume* sebesar 6% [6]. H. H. Joni and M. S. Hashim (2018) meneliti efek penambahan *silica fume* sebagai pengganti debu batu kapur pada campuran aspal emulsi dingin, dan diperoleh kadar *silica fume* 3% memberikan hasil terbaik karena dapat meningkatkan kinerja campuran aspal [7]. Selain itu sudah diteliti perbandingan penggunaan *silica fume* dengan *nano silica* untuk beberapa variasi kadar. Juga telah diteliti perbandingan penggunaan *silica fume* dengan berbagai jenis aditif yang lain yakni LDPE, rubber, nano

silica, fly ash dan kapur [8]–[11]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan silica fume pada campuran aspal jenis AC-WC (*Asphalt Concrete-Wearing Course*) yang merupakan lapisan permukaan perkerasan.

TINJAUAN PUSTAKA

Aspal Modifikasi

Aspal modifikasi merupakan aspal keras yang ditambahkan dengan suatu bahan tambah yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja aspal yang diinginkan. Cara memodifikasi aspal yang paling sering dilakukan adalah dengan pemakaian aditif [12]. Bahan tambah yang dapat digunakan secara umum dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok, antara lain: filler, karet, plastik, dsb.

Silica Fume

Silica fume merupakan salah satu bahan aditif pada campuran aspal. *The American Institute (ACI)* mendefinisikan bahwa *silica fume (micro-silica)* merupakan hasil produk sampingan pada proses pembuatan *silicon* atau *ferro-silicon alloy* menggunakan kuarsa *silica* dan batubara di dalam tanur listrik tinggi. *Silica fume* berbentuk bulat dan berwarna abu-abu yang mempunyai kisaran ukuran kurang dari 0,1 mikrometer. *Silica fume* bersifat pozzolan, dengan kadar kandungan senyawa *silica dioksida* (SiO_2) yang sangat tinggi yakni >90%, namun tidak mengandung kristal [13]. *Silica fume* yang digunakan pada penelitian ini didominasi oleh Silicon Dioxide (SiO_2) sebanyak 95,9%, selebihnya Iron Trioxide (Fe_2O_3) sebanyak 3,26%, Loss on Ignition (Lol) sebanyak 2,36%, dan Carbon sebanyak 1,14%.

Marshall Test

Pengujian ini mengacu pada AASHTO T 245-97 (2004) dan SNI 06-2489-1991. Alat Marshall Test merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan proving ring berkapasitas 22,2 KN (5000 lbs) dan *flow* meter. Benda uji Marshall Test berbentuk silinder dengan tinggi 2.5 in dan diameter 4 in yang diuji pada suhu 60°C dan diberi pembebanan hingga terjadi keruntuhan. Marshall Test bertujuan untuk mengetahui nilai stabilitas dan nilai kelelahan (*flow*) dari campuran aspal [14].

Wheel Tracking Machine (WTM) Test

WTM Test dilakukan untuk mengukur kemampuan campuran aspal menahan repetisi beban lalu lintas. Benda uji yang disiapkan untuk pengujian ini memiliki komposisi dan kepadatan yang dirancang seperti pengujian Marshall dalam kondisi kadar aspal optimum, dengan dimensi 30x30x5 cm. Pengujian ini dilakukan dengan tekanan permukaan sebesar $6,4 \pm 0,15 \text{ kg/cm}^2$ setara dengan beban sumbu tunggal roda ganda 8,16 ton. Benda uji diuji selama 1 jam sebanyak 1260 *passing* atau 42 lintasan per menit. Pengujian membutuhkan alat pendukung, yaitu *Mixer* untuk mencampur material dan *Roller Compactor* untuk memadatkan benda uji sebelum WTM Test. Dari pengujian ini diperoleh nilai stabilitas dinamis aspal dan kecepatan deformasi dari campuran aspal.

Metode Refluks

Metode Refluks merupakan salah satu pengujian ekstraksi yang dilakukan untuk membuktikan adanya kesesuaian antara gradasi agregat yang dipakai sebelum dan sesudah Marshall Test. Adapun prosedur pengujian ekstraksi metode Refluks adalah sebagai berikut :

1. Benda uji dipanaskan di dalam oven dengan temperatur 110°C agar agregat pada benda uji terpisah.
2. Setelah itu benda uji tersebut dihancurkan, lalu ditimbang.
3. Kertas filler dipersiapkan (ditimbang dan dibentuk seperti kerucut), lalu diletakkan pada saringan (keranjang).
4. Benda uji (agregat) yang sudah ditimbang tadi dimasukkan ke dalam kerucut, dipastikan kerucut diletakkan dengan rapi dan baik supaya pada saat pengujian atau pembongkaran tidak ada agregat yang jatuh/hilang.
5. Kerucut berisi agregat diletakkan ke dalam tabung *refluks extraction*, tabung dialasi kasa asbes dan diletakkan di atas pelat pemanas listrik, kemudian posisi selang diatur.
6. Pengujian dilakukan selama 24 jam hingga warna pelarut jernih, kemudian pelat pemanas listrik dimatikan dan tabung dibiarkan hingga dingin agar dapat dilepaskan.
7. Benda uji dikeluarkan dari tabung *refluks extraction*, dimasukkan ke dalam oven, setelah kering kemudian agregat dan kertas filler masing-masing ditimbang.
8. Agregat diayak menggunakan saringan dan ditimbang agregat yang tertahan.

METODE PENELITIAN

Tahap Persiapan Material

Pada tahap ini dipersiapkan material pembentuk campuran aspal, yaitu aspal, agregat, *filler* dan *silica fume*. Aspal menggunakan aspal penetrasi 60/70. Terhadap material aspal dan agregat terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan sifat-sifat fisis dimana pemeriksaan sifat fisis aspal meliputi penetrasi aspal, titik lembek, berat jenis dan daktilitas; sedangkan pemeriksaan sifat fisis agregat meliputi yaitu analisis butiran, berat jenis, penyerapan agregat kasar dan halus, serta abrasi. *Filler* yang digunakan berupa *Portland Cement* tipe I. *Silica fume* yang digunakan berbentuk butiran yang dikemas dalam kantong berukuran 20kg. *Silica Fume* ini ditambahkan pada campuran aspal dengan variasi kadar 0%, 2%, 4%, 5%, 6%, dan 8% dari berat aspal, dengan menggunakan metode pencampuran cara kering (*dry process*). Pedoman yang digunakan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 (Revisi III).

Tahap Pembuatan Benda Uji

Tahap pembuatan benda uji terbagi atas 4 bagian yaitu:

- 1. Pembuatan Benda Uji Sebelum Kadar Aspal Optimum*
Pembuatan benda uji untuk menentukan OAC dilakukan dengan membuat sampel pengujian biasa (2x75 pukulan), dengan 5 variasi kadar aspal yaitu 5%, 5,5%, 6%, 6,5% dan 7%, masing-masing sebanyak 6 benda uji. Selain itu pembuatan benda uji untuk *Percentage Refusal Density Test* (2x400 pukulan), dengan 3 variasi kadar aspal yaitu 5,5%, 6% dan 6,5%, masing-masing sebanyak 2 benda uji. Sehingga total sampel pada tahap ini sebanyak 36 benda uji.
- 2. Pembuatan Benda Uji Setelah Kadar Aspal Optimum*
Penentuan nilai *stiffness modulus* beton aspal dilakukan dengan menggunakan campuran Kadar Aspal Optimum. Berdasarkan nilai Kadar Aspal Optimum, dibuat benda uji dengan penambahan *silica fume* dengan variasi kadar 0%, 2%, 4%, 5%, 6%, dan 8%, dari berat aspal; masing-masing sebanyak 6 benda uji untuk sampel pengujian biasa, dan masing-masing sebanyak 3 benda uji untuk pengujian PRD. Sehingga total sampel pada tahap ini sebanyak 54 benda uji.
- 3. Pembuatan Benda Uji WTM Test*
Berdasarkan nilai Kadar Aspal Optimum, dibuat 2 (dua) benda uji untuk WTM Test: 1 benda uji tanpa penambahan *silica fume* (0%) dan 1 benda uji dengan penambahan *silica fume* dengan kadar 5% dari berat aspal.
- 4. Pembuatan Benda Uji untuk Pengujian Ekstraksi*
Pada campuran dengan penambahan *silica fume* untuk kadar 2%, 4%, 5%, 6% dan 8%, masing-masing dibuat benda uji sebanyak 2 buah. Sehingga total sampel pada tahap ini sebanyak 10 benda uji.

Tahap Pengujian

Tahap pengujian terdiri dari:

- 1. Pengujian Marshall untuk mendapatkan Kadar Aspal Optimum.*
Pengujian *density* dilakukan terhadap 30 benda uji dengan variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5% dan 7%, dan terhadap 6 benda uji dengan variasi kadar aspal PRD 5,5%, 6% dan 6,5%; kemudian dilakukan pengujian Marshall untuk memperoleh Kadar Aspal Optimum
- 2. Pengujian Marshall dengan Kadar Aspal Optimum.*
Pengujian *density* dilakukan terhadap 36 benda uji biasa dan 18 benda uji PRD dengan Kadar Aspal Optimum yang telah dicampur dengan *silica fume*; kemudian dilakukan pengujian Marshall untuk memperoleh nilai *stabilitas (stability)* dan kelelahan (*flow*).
- 3. Pengujian Wheel Tracking Machine (WTM)*
Pengujian ini dilakukan terhadap benda uji dengan Kadar Aspal Optimum tanpa dan dengan bahan tambah *silica fume*, untuk mendapatkan nilai *stabilitas dinamis* dan deformasi.
- 4. Pengujian Ekstraksi*
Pada penelitian ini dilaksanakan pengujian ekstraksi Metode Refluks untuk membuktikan adanya kesesuaian antara gradasi agregat yang dipakai sebelum dan sesudah Marshall Test.

HASIL DAN PEMBAHASAN

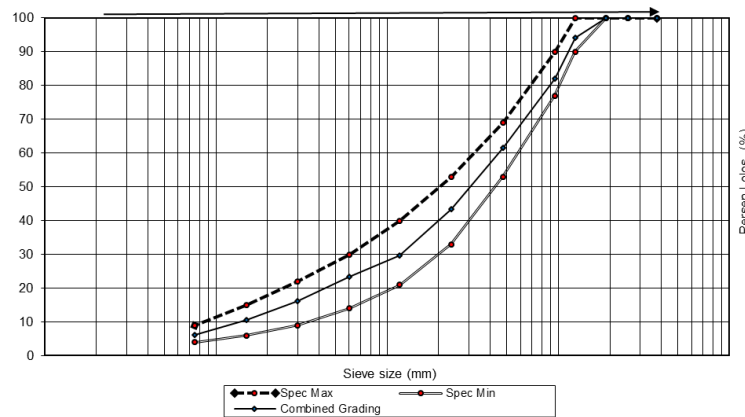
Hasil Pemeriksaan Material

Hasil pemeriksaan material meliputi hasil pemeriksaan sifat fisis aspal (Tabel 1), serta pemeriksaan agregat yang terdiri dari pemeriksaan abrasi, berat jenis dan analisa saringan (Gambar 1); seluruhnya memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi III Tahun 2010 [15]. Hasil pemeriksaan abrasi sebesar 21,58%.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Aspal

No.	Jenis Pemeriksaan Aspal	Spec.	Kadar <i>Silica Fume</i> (%)					
			0	2	4	5	6	8
1.	Penetrasi 25°C (0.1mm)	40	65,3	54,0	48,3	45,2	40,3	32,9
2.	Titik Lembek (°C)	≥54	49,0	54,0	56,0	58,0	60,0	63,0
3.	Berat Jenis	≥ 1	1,033	1,038	1,050	1,068	1,052	1,050
4.	Daktilitas (cm)	≥ 100	150,00	61,00	55,00	46,50	37,85	27,35

Dari Tabel 1 terlihat bahwa penambahan *silica fume* menurunkan nilai daktilitas yang dapat menyebabkan campuran aspal akan semakin kaku [16].



Gambar 1. Gradasi Agregat Campuran Aspal AC-WC

Hasil Pengujian Benda Uji

Hasil Marshall Test Sebelum Kadar Aspal Optimum

Sebelum menentukan Kadar Aspal Optimum, terlebih dahulu ditentukan nilai tengah (P_b) sebagai batas penentuan kadar aspal yang akan dipakai, menggunakan dengan rumus: $P_b = 0,035(\%CA) + 0,045(\%FA) + (0,18\%FF) + K = 0,035(56,64) + 0,045(37,22) + (0,18\%6,14) + 1 = 5,8\%$.

Hasil Marshall Test sebelum Kadar Aspal Optimum dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Marshall Test Campuran Aspal sebelum Kadar Aspal Optimum

No.	Jenis Pemeriksaan	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	
1	Density (%)	2,347	2,362	2,345	2,327	2,310	-
2	Stability (Kg/cm2)	1244,690	1291,139	1308,197	1373,279	1246,264	Min. 800
3	Flow (mm)	2,38	2,41	2,52	3,38	3,32	2 – 4
4	Marshall Quotient (Kg/mm)	523,712	535,002	519,813	405,895	375,004	Min. 250
5	VMA (%)	15,720	15,627	16,679	17,762	18,795	Min. 15
6	VFB (%)	68,546	76,739	78,189	79,212	80,283	Min. 65
7	VIM (%)	4,946	3,637	3,638	3,693	3,706	3-5
8	Retained Stability (%)	94%	93%	92%	90%	89%	Min 90%
9	VIM PRD (%)	-	3,518	2,790	2,397	-	Min. 2%

Dari hasil Marshall Test sebelum Kadar Aspal Optimum diperoleh nilai Kadar Aspal Optimum sebesar 5,75%.

Hasil Marshall Test Setelah Kadar Aspal Optimum

Hasil Marshall Test setelah Kadar Aspal Optimum dengan penambahan *silica fume* dengan kadar 0%, 2%, 4%, 5%, 6%, dan 8%, dari berat aspal dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Marshall Test Campuran Aspal Setelah Kadar Aspal Optimum

No.	Jenis Pemeriksaan	Kadar Aspal						Spesifikasi
		0%	2%	4%	5%	6%	8%	
1	Density (%)	2,360	2,364	2,362	2,359	2,358	2,353	-
2	Stability (Kg/cm ²)	1239,77	1316,33	1404,51	1586,37	1541,49	1325,25	Min. 1000
3	Flow (mm)	2,93	2,97	2,73	2,67	2,63	2,57	2 – 4
4	Marshall Quotient (Kg/mm)	422,65	443,71	513,84	578,06	503,26	490,77	Min. 250
5	VMA (%)	15,93	15,80	15,88	15,97	16,01	16,20	Min. 15
6	VFB (%)	80,14	80,00	78,73	71,79	68,97	66,94	Min. 65
7	VIM (%)	3,17	3,16	3,38	4,50	4,98	5,36	3 – 5
8	Stabilitas Marshall sisa	90,61%	93,20%	94,45%	94,91%	94,06%	92,71%	Min. 90%
9	VIM PRD (%)	2,08	2,15	2,23	2,33	2,52	2,55	Min. 2

Dari Tabel 3, dapat dilihat bahwa adanya penambahan *silica fume* dengan kadar 2%, 4%, 5% dan 6% pada campuran aspal memenuhi persyaratan spesifikasi, sedangkan penambahan *silica fume* dengan kadar 8% tidak memenuhi persyaratan spesifikasi.

Penambahan *silica fume* pada campuran aspal menunjukkan peningkatan nilai stabilitas, yang menunjukkan peningkatan terhadap daya ikat antara aspal dan agregat, sehingga campuran aspal akan semakin kaku dan semakin rentan terhadap keretakan. Tetapi diperlukan adanya pembatasan untuk penggunaan campuran *silica fume* karena nilai stabilitas akan menurun pada penambahan mulai kadar 6%. Hal ini terjadi disebabkan berkurangnya aspal yang digantikan oleh *silica fume*, sehingga terjadi penipisan selimut aspal pada ikatan antar agregat.

Semakin besar penambahan kadar *silica fume* menyebabkan semakin rendah nilai *flow* yang dihasilkan, sehingga campuran aspal akan semakin kaku dan getas. Nilai *flow* menunjukkan fleksibilitas campuran aspal dimana meningkatnya nilai *flow* dapat menghasilkan campuran aspal yang tidak mudah retak.

Adanya penambahan pada kadar *silica fume* terhadap campuran aspal juga menunjukkan peningkatan terhadap nilai VIM dan VMA, serta penurunan nilai VFB. Hal ini menunjukkan bahwa rongga dalam campuran dan ruang antar agregat semakin membesar, sehingga aspal dapat mengisi ruang kosong dan mengikat agregat.

Berdasarkan nilai *retained stability*, terlihat bahwa pada penambahan *silica fume* dengan kadar 5% menunjukkan kualitas campuran aspal yang optimum.

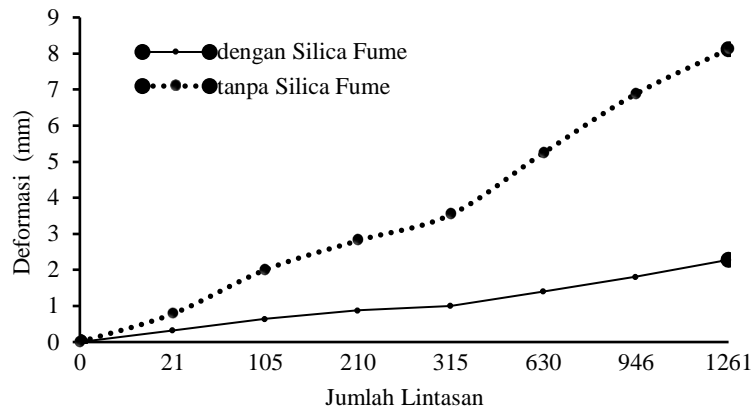
Hasil WTM Test

WTM Test dilakukan pada campuran beraspal tanpa *silica fume* (0%) dan dengan penambahan *silica fume* kadar 5%, karena pada kadar 5% merupakan kadar dengan kualitas optimum yang diperoleh dari Marshall Test. Hasil WTM Test dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 2.

Tabel 4. Hasil WTM Test

No.	Jenis Pemeriksaan	Kadar <i>Silica fume</i> (%)		Satuan	Spesifikasi
		0	5		
1	<i>Dynamic Stability</i>	508.06	1346.0	lintasan/mm	≥ 2500
2	<i>Rate of Deformation</i>	0.0827	0.0312	mm/menit	

Dari Tabel 4, dapat dilihat bahwa adanya penambahan *silica fume* dengan kadar 5% memberikan peningkatan nilai *Dynamic Stability* dibandingkan tanpa adanya penambahan *silica fume*; signifikan dengan nilai *rate of deformation* yang semakin menurun jika kadar penambahan *silica fume* semakin meningkat. Penambahan 5% *silica fume* ke dalam campuran aspal dapat meningkatkan resistensi rutting dan mengurangi kedalaman rutting.



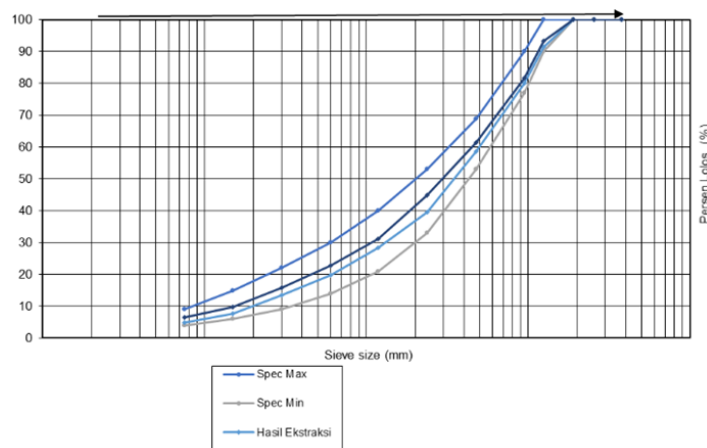
Gambar 2. Hasil Pengujian WTM

Hasil Pengujian Ekstraksi Metode Refluks

Adapun hasil pengujian ekstraksi metode refluks dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 3. Dari Gambar 5 menunjukkan bahwa gradasi yang digunakan tidak jauh berbeda dengan gradasi yang direncanakan.

Tabel 5. Hasil Pengujian Ekstraksi Metode Refluks

No. Saringan (#)	Contoh A = 1027 gram			Rata-rata contoh A & B	Contoh B = 1032 gram		
	Jumlah Berat Tertahan	Jumlah Persen			Jumlah Persen Lolos	Jumlah Berat Tertahan	
		Tertahan	Lolos				
1 1/2"-37,5	0	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0
1"-25,4	0	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0
3/4"-19	0	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0
1/2"-12,5	88,4	8,61	91,39	91,50	91,60	8,40	86,7
3/8"-9,5	195	18,99	81,01	80,09	79,17	20,83	215
4-4,75	429	41,77	58,23	58,77	59,30	40,70	420
8-2,36	643	57,06	42,94	42,64	42,34	57,66	610
16-1,18	777	73,61	26,39	29,38	32,36	67,64	698
30-0,6	865	80,14	19,86	21,71	23,55	76,45	789
50-0,3	897	87,34	12,66	14,13	15,60	84,40	882
100-0,15	955,6	92,04	7,96	8,68	9,40	90,60	944
200-0,075	996	96,98	3,02	4,97	6,93	93,07	960,5
PAN	1027	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	1032



Gambar 3. Gradasi Agregat Setelah Ekstraksi Metode Refluks

KESIMPULAN

Adanya penambahan *silica fume* terhadap campuran aspal AC-WC menyebabkan terjadinya peningkatan terhadap nilai stabilitas sampai pada kadar 5%, kemudian mengalami penurunan setelahnya. Hal ini menunjukkan perlu adanya pembatasan dalam penggunaan *silica fume*. Pada nilai *flow* justru mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar *silica fume*, dimana sifat campuran menjadi lebih kaku dan getas sehingga campuran akan lebih mudah mengalami retak. Seiring besar penambahan *silica fume* pada campuran aspal, nilai VIM dan VMA juga mengalami peningkatan. Namun sebaliknya, nilai VFB semakin menurun dengan bertambahnya kadar *silica fume*. Dari parameter *retained stability* menunjukkan bahwa terjadi peningkatan sampai dengan penambahan *silica fume* kadar 5% dan mengalami penurunan setelahnya. Berdasarkan parameter-parameter Mashall Test tersebut menunjukkan bahwa penambahan pada kadar 5% menghasilkan kualitas campuran aspal yang optimum dan sesuai dengan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi III Tahun 2010. Dari hasil WTM Test diketahui bahwa adanya penambahan *silica fume* kadar 5% pada campuran aspal menunjukkan nilai *Rate of deformation* yang dihasilkan pada campuran aspal dengan penambahan *silica fume* kadar 5% lebih rendah, sedangkan nilai *dynamic stability* lebih tinggi dibandingkan tanpa penambahan *silica fume*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sukirman, *Beton Aspal Campuran Panas*, vol. 53, no. 9. 2016. [Online]. Available: <http://ebook.itenas.ac.id/repository/9df74dd5f5afcf366e0fffb21e5a8a92.pdf>
- [2] E. A. Mostafa, M. S. Ouf, and M. F. Elgendy, "Stabilization of Subgrade Pavement Layer Using Silica Fume and Nano Silica," *Int J Sci Eng Res*, vol. 7, no. 3, 2016, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [3] H. Singh and Y. Singh, "Applications of recycled and waste materials in infrastructure projects," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019, pp. 569–585. doi: 10.1007/978-3-030-02707-0_65.
- [4] M. G. Al-Taher, H. D. Hassanin, M. F. Ibrahim, and A. M. Sawan, "Investigation of the Effect of Adding Silica Fume on Asphalt Concrete Properties," *International Journal of Engineering Research*, vol. 7, no. 4, p. 48, 2018, doi: 10.5958/2319-6890.2018.00095.8.
- [5] A. K. Al-Zajrawi, B. T. Mashkur, and Z. A. Al-Zahra, "Effect of Silica on Hot Mix Asphalt Mixture," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/737/1/012148.
- [6] C. Kai, X. Wenyuan, C. Dan, and F. Huimin, "High- and Low-Temperature properties and thermal stability of silica Fume/SBS Composite-Modified asphalt mortar," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1317436.
- [7] H. H. Joni and M. S. Hashim, "Evaluation silica fume addition on some properties of cold bitumen emulsion mixtures (CBEMs).," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Nov. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/433/1/012021.
- [8] M. G. Al-taher, H. D. Hassanin, M. F. Ibrahim, and A. M. Sawan, "Comparative Study of Performance of Modified Asphalt Mixtures Using Different Traditional and Nano Additives," *Int J Sci Eng Res*, vol. 9, no. 3, pp. 1243–1250, 2018.
- [9] Saad Issa Sarsam, "Influence of Additives on the Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete," *Britain International of Exact Sciences (BioEx) Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 162–171, Sep. 2022, doi: 10.33258/bioex.v4i3.751.
- [10] A. F. Al-Ani, "The impact of utilizing silica fume as a filler on asphalt concrete mixes," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2020, pp. 22–31. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.857.22.
- [11] S. I. Sarsam and N. Mashaan, "Detecting the Influence of Additives on Asphalt Concrete Durability," *Jurnal Kejuruteraan*, vol. 34, no. 1, pp. 51–58, Jan. 2022, doi: 10.17576/jkukm-2022-34(1)-05.
- [12] M. Porto, P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, and C. O. Rossi, "Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 4. MDPI AG, Feb. 20, 2019. doi: 10.3390/app9040742.
- [13] "Silica Fume User's Manual," 2005.
- [14] Bina Marga, *Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall*, no. 1. 1991.
- [15] Direktorat Jenderal Bina Marga, "Spesifikasi Umum Bidang Jalan dan Jembatan Divisi 6 Perkerasan Beraspal." Pusat Litbang Jalan dan Jembatan Badan Penelitian dan Pengembangan, Bandung, 2010.
- [16] H. H. Zghair, H. H. Joni, and M. S. Hassan, "Influence of Micro-Size Silica Powder on Physical and Rheological Characteristics of Asphalt Binder," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, pp. 180–184, 2018, [Online]. Available: www.sciencepubco.com/index.php/IJET