

PENGARUH PEMANFAATAN LIMBAH SANDAL JEPIT TERHADAP PARAMETER *MARSHALL* PADA CAMPURAN ASPAL PORUS

*Muhammad Darurrizqi¹, Nurani Hartatik², Yudi D. Prasetyo³

¹Fakultas Teknik, ²Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

^{*)} Email : nuranihartatik@untag-sby.ac.id

Received: 18 November 2025 ; Revised: 19 November 2025 ; Accepted: 20 November 2025

ABSTRACT

The rapidly growing industrial sector in Indonesia, ranging from home-based industries to large-scale enterprises, has the potential to generate inorganic waste containing hazardous chemicals that are difficult to decompose and may have adverse impacts on the environment. This study specifically examines waste produced from the slipper manufacturing process by a home-based industry located at Jl. Wadungasri No. 43, Waru, Sidoarjo, as an additive material in porous asphalt mixtures. Porous asphalt is a modern technology within the category of flexible pavement designed to address water puddling issues on road surfaces, owing to its physical structure that contains voids allowing water to pass through. The research methodology employed in this study follows the approach proposed by the Australian Asphalt Pavement Association (AAPA, 2004), in which the Optimum Asphalt Content (OAC) obtained was 4.72%. The testing conducted using an OAC of 4.72% involved substituting waste material into the total mixture with variations of slipper waste content at 0%, 1.5%, 3%, and 4.5%. In accordance with the porous asphalt parameters specified by the Australian Asphalt Pavement Association (2004), at an Optimum Asphalt Content (OAC) of 4.72% and with a recycled flip-flop waste variation of 1.5%, the average Cantabro Loss (CL) obtained was 28.34%, the average Air Flow Density (AFD) was 0.19%, the average Marshall Stiffness (MQ) was 614.1 kg/mm, the average stability was 1217.7 kg, and the average Voids in Mix (VIM) was 20.5%. At an OAC of 4.72% and a waste variation of 3%, the average CL obtained was 33.44%, the average AFD was 0.13%, the average MQ was 621.3 kg/mm, the average stability was 896.2 kg, and the average VIM was 21.5%. At an OAC of 4.72% and a waste variation of 4.5%, the average CL obtained was 36.76%, the average AFD was 0.07%, the average MQ was 529.4 kg/mm, the average stability was 554.6 kg, and the average VIM was 24.9%.

Keyword: *AAPA 2004, Open Graded, Flip Flops Waste, Marshall Test.*

ABSTRAK

Industri yang semakin bertumbuh pesat di Indonesia dari industri tingkat rumahan hingga industri besar dapat berpotensi menghasilkan limbah yang bersifat anorganik dan mengandung bahan kimia berbahaya yang dapat menyebabkan susah terurai bahkan berdampak buruk pada lingkungan. Salah satunya dari penelitian ini meninjau limbah dari proses produksi sandal jepit yang dihasilkan oleh industri rumahan di daerah Jl. Wadungasri No. 43, Waru, Sidoarjo sebagai bahan tambah dalam campuran aspal porus. Aspal porus merupakan teknologi modern dari jenis perkerasan lentur yang dapat mengatasi permasalahan genangan air pada jalan dikarenakan fisiknya yang memiliki rongga untuk meloloskan air. Metode yang digunakan pada penelitian ini merupakan metode pendekatan Australian Asphalt Pavement Association (AAPA 2004), dimana nilai KAO yang didapatkan sebesar 4,72%. Pengujian yang dilakukan dengan KAO 4,72% digunakan substitusi limbah pada total campuran dengan variasi kadar limbah sandal jepit 0%, 1,5%, 3%, 4,5%. Sesuai dengan parameter aspal porus yang disyaratkan oleh *Australian Asphalt Pavement Association* tahun 2004 adalah pada kondisi KAO sebesar 4,72% dan dengan variasi limbah sandal jepit sebesar 1,5% didapatkan nilai CL rata-rata sebesar 28,34%, nilai AFD rata-rata sebesar 0,19%, nilai kekakuan marshall (MQ) rata-rata sebesar 614,1 kg/mm, nilai stabilitas rata-rata sebesar 1217,7 kg, dan nilai VIM rata-rata sebesar 20,5%. Pada kondisi KAO sebesar 4,72% dan dengan variasi limbah sandal jepit sebesar 3% didapatkan nilai CL rata-rata sebesar 33,44%, nilai AFD rata-rata sebesar 0,13%, nilai kekakuan marshall (MQ) rata-rata sebesar 621,3 kg/mm, nilai stabilitas rata-rata sebesar 896,2 kg, dan nilai VIM rata-rata sebesar 21,5%. Pada kondisi KAO sebesar 4,72% dan dengan variasi limbah sandal jepit sebesar 4,5% didapatkan nilai CL rata-rata sebesar 36,76%, nilai AFD rata-rata sebesar 0,07%, nilai kekakuan *marshall* (MQ) rata-rata sebesar 529,4 kg/mm, nilai stabilitas rata-rata sebesar 554,6 kg, dan nilai VIM rata-rata sebesar 24,9%.

Kata kunci: *AAPA 2004, Gradasi Terbuka, Limbah Sandal Jepit, Pengujian Marshall.*

1. PENDAHULUAN

Jalan berfungsi sebagai sarana penghubung antara satu lokasi dengan lokasi yang lain dalam suatu daratan. Berdasarkan UU No. 38 Tahun 2004 mengenai Jalan, jalan diartikan sebagai infrastruktur transportasi darat yang mencakup seluruh komponen dari jalan, tergolong bangunan pelengkap lainnya. Kualitas pelayanan jalan yang optimal dalam hal keamanan, kenyamanan, dan kelancaran dapat tercapai apabila jalan memiliki lebar yang memadai dan tikungan yang dirancang sesuai dengan standar teknis geometrik, mencakup alinemen vertikal, alinemen horizontal, serta kenyamanan pengguna jalan tanpa suatu hambatan apapun. Dengan demikian, kendaraan yang melintas dapat beroperasi dengan aman dan nyaman sesuai dengan beban serta kecepatan yang telah dirancang [1]. Perkembangan teknologi dalam konstruksi jalan di Indonesia terus mengalami kemajuan

seiring dengan upaya mengatasi berbagai tantangan teknis dalam proses pembangunannya. Seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan, pertumbuhan ekonomi, dan peningkatan jumlah pengguna jalan, infrastruktur jalan menjadi fasilitas yang sangat vital. Kualitas jalan yang baik berperan penting dalam mendukung kelancaran transportasi serta pertumbuhan ekonomi [2].

Kerusakan pada perkerasan jalan umumnya terjadi pada lapisan permukaan, sehingga diperlukan penelitian untuk menemukan struktur perkerasan yang lebih kuat dalam menahan deformasi [3]. Aspal porus adalah inovasi baru pada perkerasan lembek yang memungkinkan air dapat meresap melalui lapis permukaan baik secara vertikal maupun horizontal. Lapisan tersebut menerapkan gradasi terbuka dan diaplikasikan di atas lapisan aspal kedap air. Keunggulan utama dari aspal porus adalah kemampuannya dalam meningkatkan keselamatan, terutama saat hujan, dengan mencegah terjadinya *aquaplaning* serta menciptakan permukaan jalan yang lebih kasar dan memiliki daya cengkeram lebih baik [4].

UU RI No. 32 tahun 2009 mengenai Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup mengungkapkan bahwasanya limbah sebagai sisa dari suatu usaha maupun kegiatan. Limbah adalah material yang mempunyai kandungan zat berbahaya, yang umumnya dihasilkan dari aktivitas manusia, termasuk proses industrialisasi. Sifat limbah dapat menimbulkan risiko bagi kehidupan, seperti manusia, hewan, serta lingkungan sekitarnya [5]. Pencemaran lingkungan akibat penumpukan sampah yang tidak terkelola dengan baik dapat dikategorikan sebagai bentuk degradasi lingkungan secara sosial. Hal ini disebabkan oleh dampak sampah yang tidak hanya memengaruhi kondisi fisik dan ekologi lingkungan, tetapi juga berdampak langsung pada kehidupan serta kesejahteraan sosial masyarakat. Di komunitas yang terkena dampak, keberadaan sampah dapat mengurangi kualitas hidup dan mengancam keberlanjutan lingkungan [6].

Aspal yang dimodifikasi dengan polimer terbukti memiliki kinerja lebih unggul, terutama dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi, mengurangi risiko retak, serta memperpanjang daya tahan terhadap kerusakan akibat usia. Hal ini berkontribusi pada umur jalan yang lebih panjang serta menekan biaya perawatan atau perbaikan. Modifikasi aspal dengan polimer terjadi melalui hubungan antar bagian aspal dan bahan aditif polimer, yang meningkatkan karakteristik material. Dalam perihal ini, penggunaan aditif polimer yang cocok dengan karakteristik *Marshall* untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah polimer plastomer jenis *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) [7].

Aspal Porus

Aspal porus atau porous asphalt adalah salah satu jenis perkerasan jalan yang dirancang dengan struktur berongga (berpori), yang memungkinkan air hujan meresap langsung melalui permukaan jalan dan mengalir ke sistem drainase di bawahnya. Tidak seperti perkerasan aspal pada umumnya yang bersifat tidak tembus air, aspal porus memberikan solusi terhadap masalah genangan air dan limpasan permukaan pada jalan raya. Struktur pori yang terbentuk berasal dari proporsi agregat kasar yang tinggi dan penggunaan sedikit atau tanpa agregat halus. Dengan begitu, terbentuk saluran - saluran kecil yang memungkinkan pergerakan air secara vertikal maupun horizontal [9].

Kadar Aspal Optimum (KAO)

Penentuan KAO sangat diperlukan untuk memenuhi persyaratan spesifikasi campuran yang ditetapkan oleh (AAPA 2004). Dalam menentukan atau mencari nilai KAO ditentukan dengan tiga parameter seperti *Cantabro Loss*, kadar rongga udara (VIM), dan *Asphalt Flow Down* seperti pada tabel berikut :

Tabel 1 Syarat Penentuan KAO

No	Parameter	Nilai
1.	Uji CL (%)	≤ 35
2.	Uji AFD (%)	≤ 0,3
3.	VIM (%)	18 – 25

Penentuan KAO melibatkan serangkaian pengujian. Awalnya, nilai OAC (*Optimum Asphalt Content*) maksimum didapatkan dari pengujian *Cantabro Loss* (CL), dengan syarat batas maksimum 35%. Selanjutnya, pengujian VIM (*Voids in Mix*) digunakan untuk menentukan OAC minimum, yang biasanya berada dalam kisaran 18% hingga 25%. Setelah mendapatkan nilai OAC minimum dan maksimum, rata-rata dari kedua nilai ini dihitung. Hasil rata-rata ini kemudian diaplikasikan pada pengujian *Asphalt Flow Down* (AFD) untuk mendapatkan nilai AFD. Akhirnya, KAO ditentukan dengan menjumlahkan nilai rata-rata OAC dengan nilai AFD yang telah diperoleh. Berikut adalah beberapa parameter aspal porus menurut AAPA tahun 2004.

Tabel 2 Parameter Aspal Porus

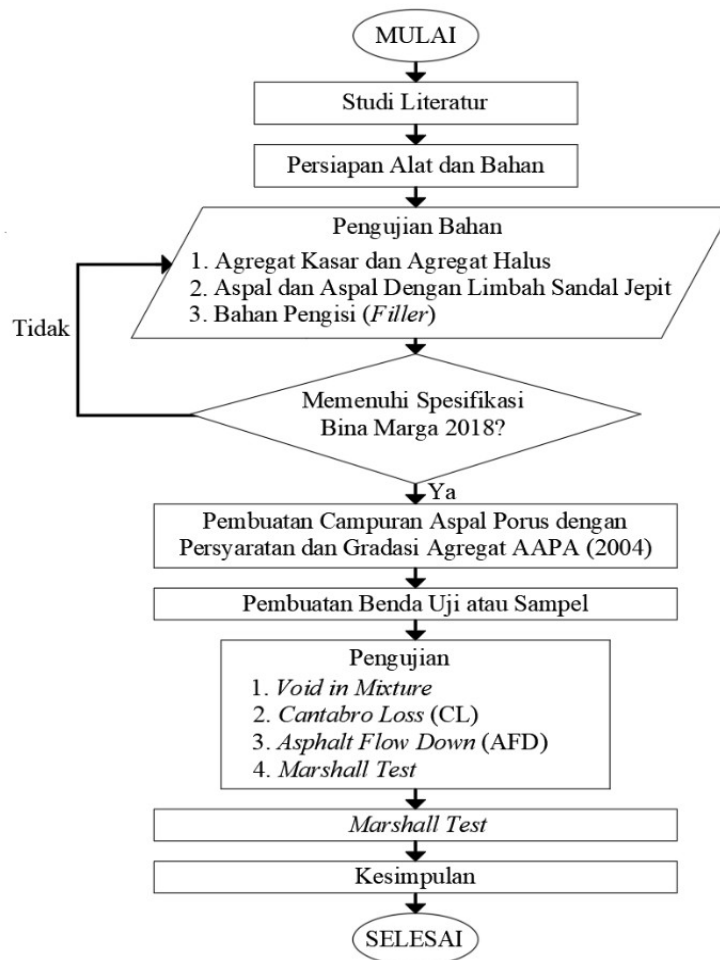
No	Parameter	Nilai
1.	Uji <i>Cantabro Loss</i> (%)	≤ 35
2.	Uji <i>Asphalt Flow Down</i> (%)	≤ 0,3
3.	Kekakuan <i>Marshall</i> (Kg/mm)	≤ 400
4.	Stabilitas <i>Marshall</i> (Kg)	≥ 500
5.	VIM (%)	18 – 25
6.	Jumlah penumbukan	50

2. METODOLOGI PENELITIAN

Diagram Alir (*Flowchart*) merupakan rentetan atau alur kerja penelitian yang memberikan gambaran susunan langkah-langkah penelitian secara sistematis agar memastikan berjalan sesuai rencana.

Diagram Alir

Diagram Alir (*Flowchart*) merupakan rentetan atau alur kerja penelitian yang memberikan gambaran susunan langkah-langkah penelitian secara sistematis agar memastikan berjalan sesuai rencana.



Gambar 1 Diagram Alir Pengujian Aspal Porus

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dan pembuatan campuran benda uji dilakukan di laboratorium. Hasil data dari pengujian di laboratorium yang kemudian dilakukan rekap yang bertujuan sebagai bahan pembahasan yang akan dijabarkan dibawah.

Rekap Pengujian Material

Rekap pengujian material ditujukan untuk mengetahui mana yang telah memenuhi persyaratan dan mana yang tidak masuk kedalam persyaratan. Rekap seluruh pengujian material dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3 Rekap Seluruh Hasil Pengujian Material

REKAPITULASI PENGUJIAN MATERIAL							
Hasil Pengujian Filler Kapur							
No	Pengujian	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan	
1	Analisa Saringan	SNI ASTM C136-2012	%	>75	89.09	Yes	
2	Berat Jenis	SNI 1970-2016	gr/cm ³	>2,5	3.42	Yes	
Hasil Pengujian Agregat Halus (0-5)							
No	Pengujian	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan	
1	Analisa Saringan	SNI ASTM C136-2012	%	<10	5.31	Yes	
2	Berat Jenis Curah (<i>Bulk</i>)	SNI 1970-2016	gr/cm ³	>2,5	2.59	Yes	
3	Berat Jenis Kering Permukaan (<i>SSD</i>)	SNI 1970-2016	gr/cm ³	>2,5	2.62	Yes	
4	Berat Jenis Semu	SNI 1970-2016	gr/cm ³	>2,5	2.67	Yes	
5	Penyerapan Air	SNI 1970-2016	%	<3	1.06	Yes	
Hasil Pengujian Agregat Kasar							
No	Pengujian	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan	
1	Analisa Saringan	SNI ASTM C136-2012	%	<1	0.96	Yes	
2	Berat Jenis Curah (<i>Bulk</i>)	SNI 1969-2016	gr/cm ³	>2,5	4.28	Yes	
3	Berat Jenis Kering Permukaan (<i>SSD</i>)	SNI 1969-2016	gr/cm ³	>2,5	4.34	Yes	
4	Berat Jenis Semu	SNI 1969-2016	gr/cm ³	>2,5	4.59	Yes	
5	Penyerapan Air	SNI 1969-2016	%	<3	1.45	Yes	
6	Keausan Agregat	SNI 2417-2008	%	<40	35.45	Yes	
7	Kelekatan Agregat	SNI 2439-2011	%	>95	95.99	Yes	
Hasil Pengujian Aspal PG 70							
No	Pengujian	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan	
1	Pentrase Aspal	SNI 2456-2011	0,1 mm	≥ 54	79	Yes	
2	Berat Jenis Aspal	SNI 2441-2011	gram	-	1.09	Yes	
3	Titik Nyala Aspal	SNI 2433-2011	°C	≥ 230	348	Yes	
4	Titik Lembek Aspal	SNI 2432-2011	°C	≥ 54	57	Yes	
Hasil Pengujian Aspal PG 70 Dengan Substitusi Limbah							
No	Pengujian	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi	Hasil	%Limbah	Keterangan
1	Pentrase Aspal	SNI 2456-2011	0,1 mm	≥ 54	84	1,5%	Yes
					56	3%	Yes
					39	4,5%	No
2	Berat Jenis Aspal	SNI 2456-2011	gr/cm ³	≥1	1.04	1,5%	Yes
					1.06	3%	Yes
					1.05	4,5%	Yes
3	Titik Nyala Aspal	SNI 2456-2011	0,1 mm	≥ 230	330	1,5%	Yes
					323	3%	Yes
					315	4,5%	Yes
4	Titik Lembek Aspal	SNI 2456-2011	0,1 mm	≥ 54	59	1,5%	Yes
					65	3%	Yes
					75	4,5%	Yes

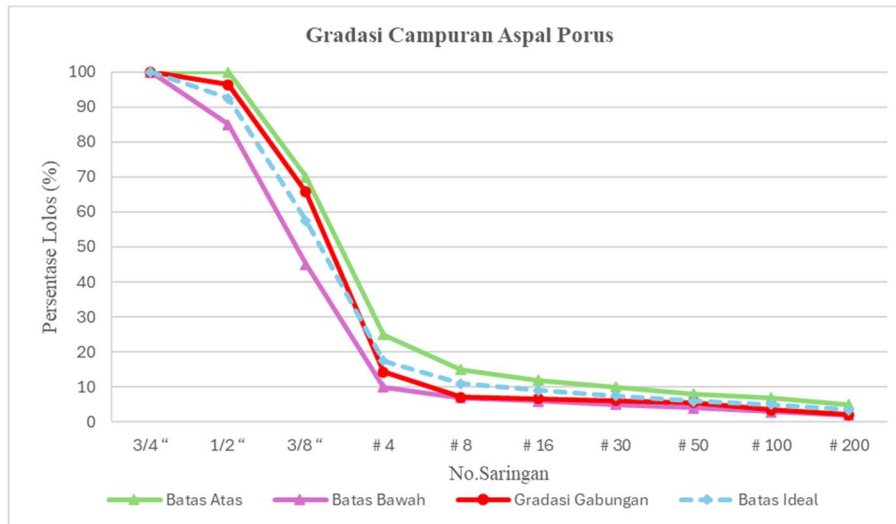
Dari hasil semua pengujian material yang telah dilakukan di laboratorium dan kemudian direkap seperti pada tabel 4.30 diatas maka dapat disimpulkan bahwa, semua pengujian material yang telah dilakukan di laboratorium menunjukkan telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018, maka pengujian aspal porus dapat dilanjutkan dengan menggunakan material yang telah memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018.

Komposisi Campuran Aspal Porus

Kadar Aspal Optimum atau disebut KAO merupakan banyaknya aspal atau persentase aspal dengan hasil yang paling dominan atau hasil yang paling baik terhadap total campuran agregat. Menurut [10] untuk menentukan kadar aspal optimum dengan menggunakan metode *Australian Asphalt Pavement Association* tahun 2004 yaitu mensyaratkan tiga parameter yaitu VIM, AFD, dan CL.

Tabel 4 Gradasi Pencampuran Agregat

Fraksi Agregat	Persentase Fraksi	
Fraksi 0-5 mm	5	%
Fraksi 5-10	22	%
Fraksi 10-15	72	%
Filler (Kapur)	1	%
Total	100	%



Grafik 1 Gradasi Agregat Untuk Penentuan KAO

Setelah telah didapatkan gradasi agregat dan perbandingan fraksi agregat dari total campuran maka dilakukan penentuan nilai tengah dari lima variasi kadar aspal dengan cara nilai perbandingan fraksi agregat dikalikan dengan koefisien Pb yaitu $0,035 \times$ persentase fraksi agregat kasar (%CA) ditambah $0,045 \times$ agregat fraksi 10-15 + agregat fraksi 0-5 (%MA+%FA) ditambah $0,18 \times$ persentase filler kapur (FF) ditambah koefisien $0,5 \text{ s/d } 1$ (K).

Tabel 5 Nilai Tengah Variasi Kadar Aspal

Nilai Tengah (Pb)	
%CA	72
%MA	22
%FA	5
%FF	1
K	1
Pb	4.92
%	4.92%
Pembulatan	5%

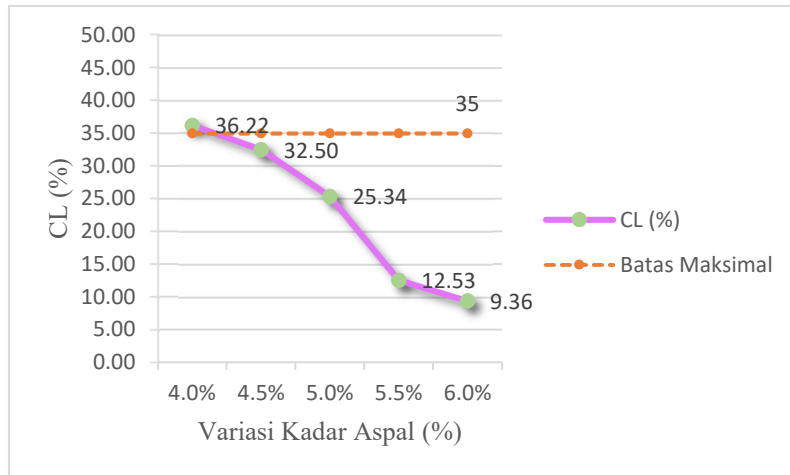
Maka didapatkan nilai tengah dari variasi kadar aspal adalah sebesar 4,92% atau dibulatkan menjadi 5%, langkah selanjutnya adalah pembuatan resep briket untuk menentukan kondisi KAO.

Rekap Pengujian CL Untuk KAO

Pengujian *Cantabro Loss* digunakan untuk mendapatkan nilai OAC Max sebagai salah satu nilai untuk menentukan nilai kadar aspal optimum (KAO).

Tabel 7 Hasil Pengujian CL Untuk Penentuan KAO

Pengujian Dengan Filler 1%	Notasi	Variasi Kadar Aspal				
		4%	4.5%	5%	5.5%	6%
Berat Campuran Sebelum Abrasi (W1)	gr	1172.13	1150.30	1141.60	1151.80	1109.20
Berat Campuran Sesudah Abrasi (W2)	gr	747.67	777.47	852.20	1007.63	1004.87
Kehilangan Berat Campuran (W1-W2)	gr	424.47	372.83	289.40	144.17	104.33
Perhitungan	Persamaan	Hasil				
<i>Cantabro Loss</i> (%)	$\left(\frac{W1 - W2}{W1}\right) \times 100$	36.22	32.50	25.34	12.53	9.36
OAC max 35% (%)		4.16				



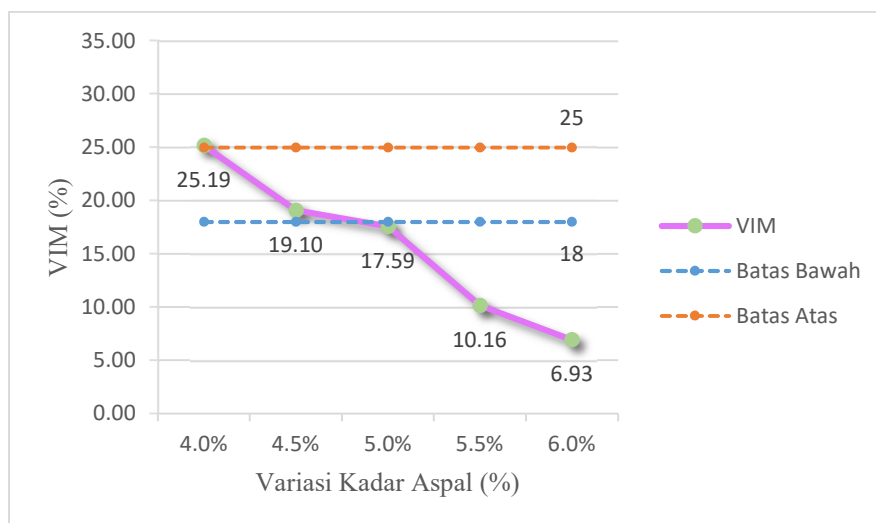
Grafik 2 Hubungan CL Dengan Variasi Kadar Aspal

Rekap Pengujian Vim Untuk KAO

Pengujian *Void in Mixture* digunakan untuk mendapatkan nilai sebagai salah satu nilai untuk menentukan nilai kadar aspal optimum (KAO).

Tabel 9 Hasil Pengujian VIM Untuk Penentuan KAO

Pengujian Dengan <i>Filler</i> 1%	Notasi	Variasi Kadar Aspal				
		4%	4.5%	5%	5.5%	6%
Berat Kering Campuran Dalam Udara (<i>Wd</i>)	gr	1026	1044.4	1054.1	1123.9	1117.3
Berat Campuran Dalam Air (<i>Ww</i>)	gr	636	629.67	627.33	626.67	628
Berat Jenuh Kering Permukaan (<i>Wssd</i>)	gr	1157.5	1143.9	1144.7	1180.4	1153.6
Perhitungan	Persamaan	Hasil				
	$\frac{Wd}{Wd - Ww}$					
Berat Jenis Teoritis Campuran (<i>Gmm</i>) gr/cc		2.63	2.57	2.56	2.27	2.29
	$\frac{Wd}{Wssd - Ww}$					
Berat Jenis Bulk Campuran (<i>Gmb</i>) gr/cc		1.97	2.08	2.10	2.04	2.13
	$\left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm}\right) \times 100$					
<i>Void in Mixture</i> (%)		25.19	19.10	17.59	10.16	6.93
OAC min 18% (%)		4.86				



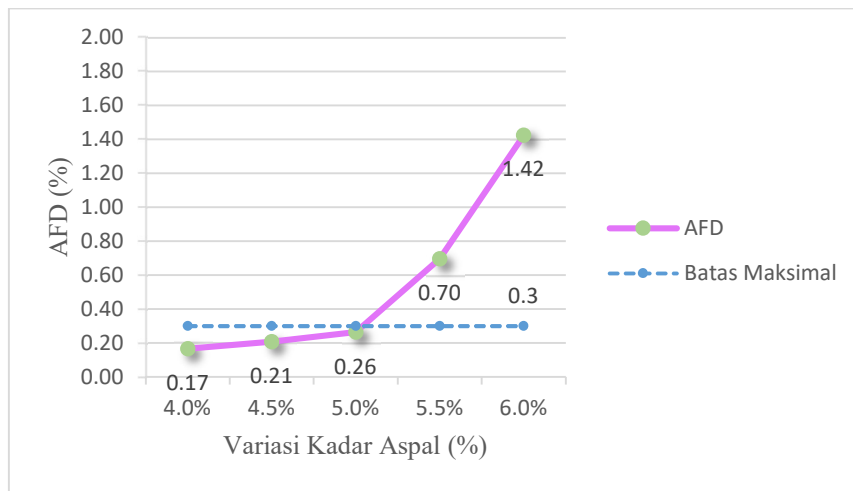
Gambar 4 Hubungan VIM Dengan Variasi Kadar Aspal

Rekap Pengujian AFD Untuk KAO

Pengujian *Asphalt Flow Down* digunakan untuk mendapatkan nilai sebagai salah satu nilai untuk menentukan nilai kadar aspal optimum (KAO).

Tabel 8 Pengujian AFD Untuk Penentuan KAO

Pengujian Dengan <i>Filler</i> 1%	Notasi	Variasi Kadar Aspal				
		4%	4.5%	5%	5.5%	6%
Berat Nampan (M1)	gr	542	133.5	487.3	543.1	135.2
Berat Nampan + Campuran Sebelum Oven (M2)	gr	1574.8	1311.6	1483.6	1671.2	1317.1
Berat Nampan + Campuran Sesudah Oven (M3)	gr	543.7	135.9	489.9	550.9	152.0
Perhitungan <i>Asphalt Flow Down</i> (%)	Persamaan	3	3	3	7	7
OAC mid (%)	$\left(\frac{M3 - M1}{M2 - M1}\right) \times 1$	0.17	0.21	Hasil	0.26	0.70
				Koreksi AFD		1.42
		4.51		0.21		



Gambar 3 Hubungan AFD Dengan Variasi Kadar Aspal

Dari hasil dari pengujian dilaboratorium bahwa didapatkan nilai OAC max dari pengujian CL adalah sebesar 4,16%, nilai OAC min pada pengujian VIM adalah sebesar 4,86%, dan nilai tengah untuk koreksi AFD adalah sebesar 0,21%.

Tabel 10 Hasil Kadar Aspal Optimum Briket

Hasil Kadar Aspal Optimum	
Persamaan	Hasil (%)
$\left(\frac{OACmin + OACmax}{2}\right) + Kor. AFD$	4.72

Setelah didapatkan nilai OAC max dan OAC min maka direrata kedua hasil tersebut dan diplot dengan AFD, maka didapatkan nilai kadar aspal optimum sebesar 4,72%.

Karakteristik *Marshall*

Pengujian *Marshall* dilakukan untuk melihat suatu sifat perkerasan aspal dengan menggunakan alat tekan yang bernama *Marshall Test Machine*. Pengujian tersebut mempunyai tujuan mengetahui nilai stabilitas dan *flow* suatu padatan aspal. Pengujian tersebut dilakukan untuk mengetahui karakteristik briket aspal telah memenuhi persyaratan dari *Australian Asphalt Pavement Association* tahun 2004. Pengujian *Marshall Test* tersebut dapat mengacu pada SNI 06-2489-1991.

Tabel 14 Persyaratan Karakteristik Marshall AAPA 2004

No	Parameter	Hasil			Syarat	Memenuhi YA / TIDAK
		1.5%	3.0%	4.5%		
1	Uji <i>Cantabro Loss</i> (%)	28.34	33.44	36.76	≤ 35	YA
2	Uji <i>Asphalt Flow Down</i> (%)	0.19	0.13	0.07	$\leq 0,3$	YA
3	Kekakuan <i>Marshall</i> (Kg/mm)	614.1	621.3	529.4	≤ 400	TIDAK
4	Stabilitas <i>Marshall</i> (Kg)	1217.7	896.2	554.6	≥ 500	YA
5	VIM (%)	20.53	21.47	24.89	18 – 25	YA
6	Jumlah penumbukan	50	50	50	50	YA

Dari rekap pengujian marshall diatas maka dapat disimpulkan bahwa pada kadar variasi limbah 1,5% pada kadar variasi limbah 1,5% didapatkan nilai stabilitas marshall dengan rata-rata sebesar 1217,7 kg dengan nilai pelelehan atau flow sebesar 2 mm, nilai MQ sebesar 614,1 kg/mm, nilai VMA rata-rata sebesar 51,8%, nilai VIM rata-rata sebesar 20,5%, dan nilai VFWA rata-rata sebesar 60,3%. Pada kadar variasi limbah 3% didapatkan nilai stabilitas marshall dengan rata-rata sebesar 896,2 kg dengan nilai pelelehan atau flow sebesar 1,5 mm, nilai MQ sebesar 621,3 kg/mm, nilai VMA rata-rata sebesar 52,5%, nilai VIM rata-rata sebesar 21,5%, dan nilai VFWA rata-rata sebesar 59,2%. Pada kadar variasi limbah 4,5% didapatkan nilai stabilitas marshall dengan rata-rata sebesar 554,6 kg dengan nilai pelelehan atau flow sebesar 1,1 mm, nilai MQ sebesar 529,4 kg/mm, nilai VMA rata-rata sebesar 51,6%, nilai VIM rata-rata sebesar 24,9%, dan nilai VFWA rata-rata sebesar 51,7%.

4. KESIMPULAN

Setelah dilakukan dilakukan beberapa tahapan pengujian dan analisa seperti pengujian material, analisa penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO), dan pengujian *marshall* untuk mengetahui karakteristik *marshall* pada campuran aspal porus, maka tahap terakhir adalah kesimpulan dari proses penelitian campuran aspal porus dengan substitusi limbah sandal jepit yang akan dijabarkan sebagai berikut :

1. Pengujian Material

Berdasarkan hasil semua pengujian material yang telah dilakukan di laboratorium dan kemudian direkap seperti pada tabel 4.30 diatas maka dapat disimpulkan bahwa, semua pengujian material yang telah dilakukan di laboratorium menunjukkan telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018, maka pengujian aspal porus dapat dilanjutkan dengan menggunakan material yang telah memenuhi standar Spesifikasi Umum Bina Marga (Revisi 2) Tahun 2018.

2. Analisa Penentuan KAO

Dari hasil dari pengujian dilaboratorium bahwa didapatkan nilai OAC max dari pengujian CL adalah sebesar 4,16%, nilai OAC min pada pengujian VIM adalah sebesar 4,86%, dan nilai tengah untuk koreksi AFD adalah sebesar 0,21%. Setelah didapatkan nilai OAC max dan OAC min maka direrata kedua hasil tersebut dan diplot dengan AFD, maka didapatkan nilai Kadar Aspal Optimum sebesar 4,72%.

3. Pengujian *Marshall*

Dari rekap pengujian marshall diatas maka dapat disimpulkan bahwa pada kadar variasi limbah 1,5% didapatkan nilai stabilitas marshall dengan rata-rata sebesar 1217,7 kg dengan nilai pelelehan atau flow sebesar 2 mm, nilai MQ sebesar 614,1 kg/mm, nilai VMA rata-rata sebesar 51,8%, nilai VIM rata-rata sebesar 20,5%, dan nilai VFWA rata-rata sebesar 60,3%. Pada kadar variasi limbah 3% didapatkan nilai stabilitas marshall dengan rata-rata sebesar 896,2 kg dengan nilai pelelehan atau flow sebesar 1,5 mm, nilai MQ sebesar 621,3 kg/mm, nilai VMA rata-rata sebesar 52,5%, nilai VIM rata-rata sebesar 21,5%, dan nilai VFWA rata-rata sebesar 59,2%. Pada kadar variasi limbah 4,5% didapatkan nilai stabilitas marshall dengan rata-rata sebesar 554,6 kg dengan nilai pelelehan atau flow sebesar 1,1 mm, nilai MQ sebesar 529,4 kg/mm, nilai VMA rata-rata sebesar 51,6%, nilai VIM rata-rata sebesar 24,9%, dan nilai VFWA rata-rata sebesar 51,7%.

Maka dari seluruh pengujian tersebut, kesimpulan yang sesuai dengan parameter aspal porus yang disyaratkan oleh *Australian Asphalt Pavement Association* tahun 2004 adalah pada kondisi KAO sebesar 4,72% dan dengan variasi limbah sandal jepit sebesar 1,5% didapatkan nilai CL rata-rata sebesar 28,34%, nilai AFD rata-rata sebesar 0,19%, nilai kekakuan *marshall* (MQ) rata-rata sebesar 614,1 kg/mm, nilai stabilitas rata-rata sebesar 1217,7 kg, dan nilai VIM rata-rata sebesar 20,5%. Pada kondisi KAO sebesar 4,72% dan dengan variasi limbah sandal jepit sebesar 3% didapatkan nilai CL rata-rata sebesar 33,44%, nilai AFD rata-rata sebesar 0,13%, nilai kekakuan *marshall* (MQ) rata-rata sebesar 621,3 kg/mm, nilai stabilitas rata-rata sebesar 896,2 kg, dan nilai VIM rata-rata sebesar 21,5%. Pada kondisi KAO sebesar 4,72% dan dengan variasi limbah sandal jepit sebesar 4,5% didapatkan nilai CL rata-rata sebesar 36,76%, nilai AFD rata-rata sebesar 0,07%, nilai kekakuan *marshall* (MQ) rata-rata sebesar 529,4 kg/mm, nilai stabilitas rata-rata sebesar 554,6 kg, dan nilai VIM rata-rata sebesar 24,9%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. L. Saputra, ... *SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT KASAR TERTAHAN SARINGAN 3/8" DAN No. 4 PADA CAMPURAN ASPAL PORUS DENGAN PERSENTASE KADAR ASPAL 6, 5* etd.umy.ac.id, 2022. [Online]. Available: <https://etd.umy.ac.id/id/eprint/35785/>
- [2] A. F. Senudin, *Pemanfaatan Limbah Sarung Tangan Sebagai Bahan Tambah Campuran Aspal Porus (Porous Asphalt).* eprints.unmer.ac.id, 2022. [Online]. Available: <https://eprints.unmer.ac.id/id/eprint/4302/>
- [3] Z. Arwan, "STUDI PENGGUNAAN LIMBAH LAS KARBIT SEBAGAI SUBSTITUSI PADA FILLER TERHADAP CAMPURAN ASPAL PORUS.," *repository.unifa.ac.id*, [Online]. Available: <http://repository.unifa.ac.id/1646/1/ARWAN%20Z%20SIP23.pdf>
- [4] N. Suryatama, S. Putra, and ..., "Karakteristik Campuran Aspal Porus Dengan Menggunakan Material Dari Lampung," *Jurnal Rekayasa Sipil ...*, 2023, [Online]. Available: <https://journal.eng.unila.ac.id/index.php/jrsdd/article/view/3270>
- [5] K. K. Pavitasari and F. U. Najicha, "Pertanggungjawaban Pihak Ketiga Jasa Pengolah Limbah B3 dalam Mengelola Limbah B3," *Tanjungpura Law Journal*, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/tlj/article/view/47471>
- [6] A. P. Utami, N. N. A. Pane, and A. Hasibuan, "Analisis dampak limbah/sampah rumah tangga terhadap pencemaran lingkungan hidup," *Cross-border*, 2023, [Online]. Available: <https://journal.iaisambas.ac.id/index.php/Cross-Border/article/view/2138>
- [7] N. Safitri, ... *LIMBAH PLASTIK ETHYLENE VINYL ACETATE DAN GRAPHENE SEBAGAI BAHAN TAMBAH UNTUK MENINGKATKAN KINERJA CAMPURAN ASPAL AC-WC.* rama.unimal.ac.id, 2024. [Online]. Available: <https://rama.unimal.ac.id/id/eprint/9360/>
- [8] I. Israil, M. Tumpu, W. Tjaronge, and S. Gusty, *Aspal Buton (Bitumen dalam Pembentukan Aspal Emulsi).* repository.unifa.ac.id, 2024. [Online]. Available: <https://repository.unifa.ac.id/id/eprint/1135/>
- [9] L. G. Bitu and A. Putri, "Pengaruh Penggunaan Limbah Plastik (Polimer Pet) Sebagai Bahan Tambah Terhadap Karakteristik Aspal Porous.," *Jurnal MEDIA INOVASI Teknik Sipil ...*, 2018, [Online]. Available: <http://ejournal.unidayan.ac.id/index.php/JMI/article/view/296>
- [10] J. Angkoso, *Perbandingan Kinerja Campuran Aspal Porus Menggunakan Spesifikasi Australia (AAPA) dan California (Caltrans) dengan Serbuk Parutan Limbah Ban Karet.* dspace.uui.ac.id, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/52666>