

PENGARUH VARIASI TUMBUKAN PADA KADAR ASPAL OPTIMUM TERHADAP CAMPURAN LATASTON (HRS-BASE) DENGAN METODE MARSHALL TEST

Niccolo Yanthonius Adventus Agung Ninu¹, Krisantos Ria Bela^{2*}, Christiani Chandra Manubulu²

¹ Mahasiswa Program Studi Sipil, Universitas Katolik Widya Mandira, Jl. San Juan No.1 Penfui, Kupang, NTT, Indonesia

² Program Studi Sipil, Universitas Katolik Widya Mandira, Jl. San Juan No.1 Penfui, Kupang, NTT, Indonesia
email: krisantosbela@unwira.ac.id

Abstrak: Pemadatan merupakan faktor penting yang mempengaruhi kualitas dan kinerja perkerasan jalan. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi jumlah tumbukan pada kadar aspal optimum terhadap campuran Lataston (HRS-Base) menggunakan metode Marshall Test. Variasi jumlah tumbukan yang diuji adalah 2 x 40, 2 x 50, 2 x 60, dan 2 x 70 tumbukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai stabilitas meningkat dari 841,19 kg pada 2 x 40 tumbukan menjadi 1151,42 kg pada 2 x 70 tumbukan. Nilai flow menurun dari 3,45 mm pada 2 x 40 tumbukan menjadi 3,18 mm pada 2 x 70 tumbukan. Nilai Marshall Quotient (MQ) meningkat dari 243,85 kg/mm pada 2 x 40 tumbukan menjadi 362,72 kg/mm pada 2 x 70 tumbukan. Nilai Void in the Mineral Aggregate (VMA) menurun dari 19,30% pada 2 x 40 tumbukan menjadi 17,02% pada 2 x 70 tumbukan. Nilai Void in Mix (VIM) juga menurun dari 5,22% pada 2 x 40 tumbukan menjadi 2,54% pada 2 x 70 tumbukan. Nilai Void Filled with Asphalt (VFA) meningkat dari 72,94% pada 2 x 40 tumbukan menjadi 85,10% pada 2 x 70 tumbukan. Kepadatan campuran meningkat dari 2,271 gr/cm³ pada 2 x 40 tumbukan menjadi 2,335 gr/cm³ pada 2 x 70 tumbukan. Namun, hanya variasi tumbukan 2 x 50 yang memenuhi semua parameter spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Pemadatan 2 x 40 tumbukan memiliki MQ rendah dan VIM tinggi, sedangkan 2 x 60 dan 2 x 70 tumbukan memiliki VIM di bawah batas minimum. Hasil ini menunjukkan pentingnya keseimbangan dalam pemadatan untuk meningkatkan kualitas perkerasan jalan.

Kata Kunci: Variasi tumbukan, kadar aspal optimum, lataston HRS-Base, marshall test

Abstract: Compaction is a crucial factor that affects the quality and performance of road pavements. This study evaluates the impact of varying compaction blows at the optimum asphalt content on Lataston (HRS-Base) mixtures using the Marshall Test method. The tested compaction variations are 2 x 40, 2 x 50, 2 x 60, and 2 x 70 blows. The results show that stability values increase from 841.19 kg at 2 x 40 blows to 1151.42 kg at 2 x 70 blows. Flow values decrease from 3.45 mm at 2 x 40 blows to 3.18 mm at 2 x 70 blows. The Marshall Quotient (MQ) increases from 243.85 kg/mm at 2 x 40 blows to 362.72 kg/mm at 2 x 70 blows. The Void in the Mineral Aggregate (VMA) decreases from 19.30% at 2 x 40 blows to 17.02% at 2 x 70 blows. The Void in Mix (VIM) also decreases from 5.22% at 2 x 40 blows to 2.54% at 2 x 70 blows. The Void Filled with Asphalt (VFA) increases from 72.94% at 2 x 40 blows to 85.10% at 2 x 70 blows. The density of the mixture increases from 2.271 gr/cm³ at 2 x 40 blows to 2.335 gr/cm³ at 2 x 70 blows. However, only the 2 x 50 blows variation meets all the parameters specified in Bina Marga 2018 Revision 2. The 2 x 40 blows compaction results in low MQ and high VIM, while the 2 x 60 and 2 x 70 blows compaction results in VIM below the minimum limit. These findings highlight the importance of balanced compaction to enhance road pavement quality.

Keywords: Variation of blows, optimum asphalt content, Lataston HRS-Base, Marshall Test

1. PENDAHULUAN

Prasarana transportasi berupa jalan merupakan salah satu unsur penting dalam pengembangan wilayah yang mengalami perkembangan sangat pesat [1]. Jalan berperan penting dalam mendukung mobilitas manusia dan barang, yang pada gilirannya berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi dan sosial suatu daerah. Oleh karena itu, kinerja

perkerasan jalan menjadi faktor krusial yang harus diperhatikan dalam upaya pengembangan infrastruktur [2]. Kinerja ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti mutu material, beban lalu lintas, kondisi lingkungan, serta proses pengerjaan [3].

Salah satu aspek kritis dalam proses pengerjaan jalan adalah pemadatan. Pemadatan yang tepat sangat penting untuk memastikan

keawetan dan kekuatan lapisan perkerasan. Pemadatan yang tidak memadai dapat mengakibatkan kerusakan dini pada jalan, yang berujung pada biaya perbaikan yang tinggi dan gangguan terhadap pengguna jalan [4]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap pemadatan sangat diperlukan.

Pengujian pemadatan di laboratorium umumnya dilakukan dengan alat penumbuk Marshall, yang dilakukan secara manual menggunakan tenaga manusia. Standar pemadatan di laboratorium ini seringkali ditetapkan pada 2 x 50 tumbukan. Namun, untuk mencerminkan kondisi yang lebih bervariasi di lapangan, penelitian ini juga akan menguji jumlah tumbukan yang berbeda, yaitu 2 x 40, 2 x 60, dan 2 x 70 tumbukan. Variasi ini penting karena kondisi di lapangan sering kali tidak sesuai dengan hasil pengujian di laboratorium, yang bisa menyebabkan kerusakan jalan terjadi lebih awal dari umur rencana [5], [6].

Struktur lapisan perkerasan lentur dengan campuran panas, yang dikenal sebagai *Hot Mix*, merupakan salah satu jenis perkerasan yang sering digunakan. Salah satu campuran *Hot Mix* yang populer adalah Lataston (Lapis Tipis Aspal Beton) atau *Hot Roller Sheet* (HRS). Lataston terdiri dari dua jenis campuran, yaitu lapis aus (HRS-WC) dan lapis pondasi (HRS-Base) [7]. HRS-Base, yang berada di bawah lapisan HRS-WC, berfungsi sebagai lapis perkerasan yang menahan beban roda kendaraan dan menyebarkan beban tersebut ke lapisan bawah. Peningkatan volume kendaraan, terutama kendaraan yang melebihi beban yang direncanakan (*overload*), memiliki pengaruh langsung terhadap keawetan dan kekuatan HRS-Base.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah tumbukan pada kadar aspal optimum terhadap campuran Lataston (HRS-Base) menggunakan metode *Marshall Test*. Spesifikasi yang digunakan adalah Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 untuk campuran *Asphalt Hot Roller Sheet* (HRS-Base). Data hasil pengujian dianalisis dengan menggunakan parameter Marshall untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO). Kadar aspal optimum ini kemudian akan digunakan dalam pengujian selanjutnya dengan variasi jumlah tumbukan (2 x 40, 2 x 50, 2 x 60, 2 x 70). Pengujian Marshall

kembali dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah tumbukan terhadap nilai-nilai parameter Marshall.

Dengan melakukan penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana variasi jumlah tumbukan mempengaruhi karakteristik campuran Lataston (HRS-Base). Hasil dari penelitian ini dapat menjadi acuan dalam perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan perkerasan jalan raya, sehingga dapat meningkatkan kualitas dan keawetan jalan.

2. METODE

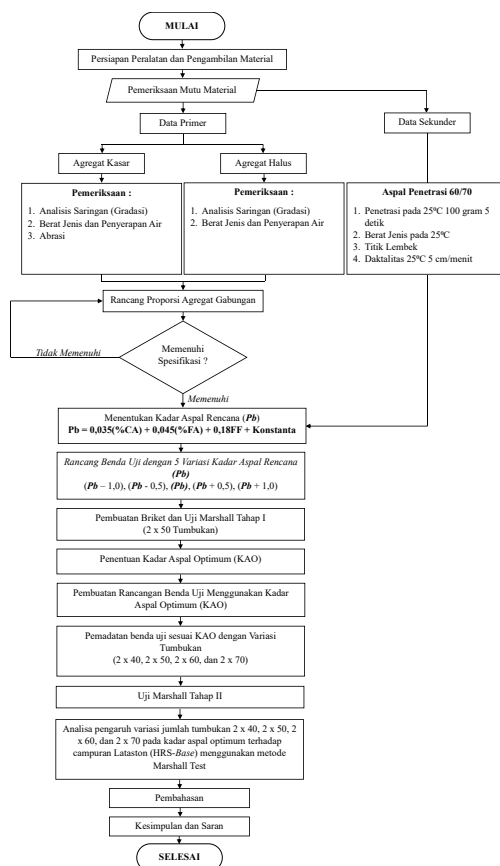
Penelitian ini dilaksanakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah tumbukan pada kadar aspal optimum terhadap campuran Lataston (HRS-Base) menggunakan metode Marshall Test. Sampel material diambil dari sungai Pariti, Kecamatan Sulamu, Kabupaten Kupang, yang merupakan hasil produksi unit pemecah batu (*stone crusher*) milik PT. Cahaya Berlian Jaya Abadi. Sampel terdiri dari fraksi agregat kasar (batu pecah 3/4"), fraksi agregat sedang (batu pecah 1/2"), dan fraksi agregat halus (abu batu). Metode pengambilan sampel agregat mengacu pada SNI 03-6889-2002, dengan teknik *systematic random sampling*. Pengambilan sampel dilakukan secara acak dari bagian bawah, tengah, dan atas setiap tumpukan agregat di tempat penampungan (*stockpile*), memastikan setiap ukuran butiran dalam material terwakili dalam sampel yang diambil [8].

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Dinas Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Untuk mempermudah dan mempercepat pelaksanaan penelitian, telah disusun sebuah bagan alir metode penelitian yang menjelaskan tahapan prosedur penelitian seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1** dibawah.

Prosedur pemeriksaan agregat dan aspal melibatkan beberapa langkah pengujian untuk memastikan kualitas material yang digunakan. Pengujian terhadap agregat meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan air sesuai dengan SNI 1969:2016 [9], uji keausan agregat atau abrasi berdasarkan SNI 2417:2008 [10], dan analisa saringan atau gradasi menurut SNI-ASTM C136:2012 [11]. Untuk bahan pengikat

berupa aspal penetrasi 60/70, digunakan data sekunder yang sudah tersedia.

Selanjutnya, sampel-sampel tersebut diuji menggunakan metode Marshall Test untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO). KAO yang diperoleh kemudian digunakan dalam pengujian dengan variasi jumlah tumbukan (2 x 40, 2 x 50, 2 x 60, dan 2 x 70). Pengujian ulang dengan Marshall Test dilakukan untuk menilai pengaruh variasi jumlah tumbukan terhadap karakteristik HRS-Base, termasuk stabilitas, *flow*, *Void in the Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled with Asphalt* (VFA), kepadatan, dan *Marshall Quotient* (MQ).



Gambar 1. Diagram alir penelitian

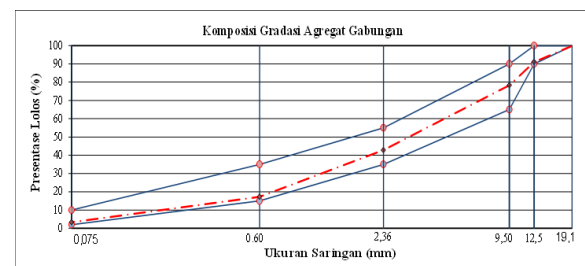
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemeriksaan Mutu Material dan Rancang Gradasi Agregat Gabungan

Material agregat yang diuji di Laboratorium Dinas Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Provinsi Nusa Tenggara Timur, menunjukkan hasil yang memenuhi berbagai kriteria kualitas. Pengujian mencakup berat jenis dan penyerapan air sesuai dengan SNI 1969:2016, keausan atau abrasi agregat

berdasarkan SNI 2417:2008, serta analisis saringan atau gradasi menurut SNI-ASTM C136:2012. Semua material agregat terbukti lolos uji saringan dengan baik, memiliki berat jenis yang tepat, penyerapan air di bawah batas maksimum, dan nilai abrasi dalam batas toleransi. Dengan hasil ini, material tersebut dinyatakan siap digunakan dalam campuran beton aspal untuk lapisan *Hot Rolled Sheet - Base* (HRS-Base) sesuai standar Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2.

Langkah berikutnya adalah merancang komposisi agregat gabungan untuk menentukan proporsi relatif dari setiap fraksi agregat dalam campuran, sehingga kadar aspal yang diperlukan (kadar aspal tengah atau Pb) bisa diperkirakan dengan akurat. Proses ini sering dilakukan dengan metode uji coba (*trial and error*) untuk menemukan proporsi ideal dari masing-masing jenis agregat guna mencapai hasil pencampuran yang optimal. Gradasi atau distribusi ukuran agregat diuji dan disajikan dalam bentuk kurva gradasi, yang menggambarkan hubungan antara persentase material yang lolos saringan dan ukuran saringan. Kurva ini memastikan bahwa distribusi ukuran agregat berada di posisi yang seimbang di antara batas atas dan batas bawah [12], [13], sebagaimana diilustrasikan dalam **Gambar 2** berikut ini.



Gambar 2. Kurva Komposisi Gradasi Agregat Gabungan HRS-Base

3.2 Penentuan Kadar Aspal Rencana (Pb), Rancang Benda Uji, dan Pengujian Marshall Tahap I (2 x 50 Tumbukan)

Kadar aspal dalam campuran aspal beton berfungsi untuk melapisi butir-butir agregat, mengisi pori-pori agregat, serta menutupi aspal yang terserap ke dalam pori-pori butiran agregat. Penentuan kadar aspal rencana dapat dilakukan setelah mendapatkan gradasi agregat gabungan dari setiap fraksi agregat sesuai dengan standar Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

Hasil analisis menunjukkan bahwa persentase lolos saringan untuk masing-masing gradasi butiran adalah sebagai berikut: agregat kasar (CA) sebesar 47,91%, agregat halus (FA) sebesar 48,73%, dan *filler* (FF) sebesar 3,36%. Dalam perhitungan ini, digunakan konstanta (*k*) dengan nilai 2,00 yang sesuai untuk lataston. Berdasarkan hasil analisis tersebut, kadar aspal rencana (*Pb*) yang diperoleh adalah sebesar 6,47%, yang kemudian dibulatkan menjadi 6,50%.

Setelah menetapkan komposisi gradasi agregat gabungan, langkah selanjutnya adalah merancang benda uji menggunakan kadar aspal rencana (*Pb*), dengan variasi kadar aspal untuk lataston HRS-Base ditetapkan menjadi 5,50%, 6,00%, 6,50%, 7,00%, dan 7,50%. Untuk setiap variasi kadar aspal yang akan diuji Marshall, dibutuhkan dua buah sampel dengan Formula Campuran Rencana seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Pengujian Marshall dilakukan dengan pemadatan menggunakan Manual Marshall Compactor sebanyak 2 x 50 tumbukan, pada suhu pemadatan normal 145°C. Tujuan pengujian Marshall ini adalah untuk menilai kinerja beton aspal padat pada lima kadar aspal dengan menggunakan parameter Marshall, yang meliputi stabilitas, *flow*, kepadatan, *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void in the Mix* (VIM), *Void Filled with Asphalt* (VFA), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil dari Marshall Test untuk lataston HRS-Base disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Formula Campuran Rencana

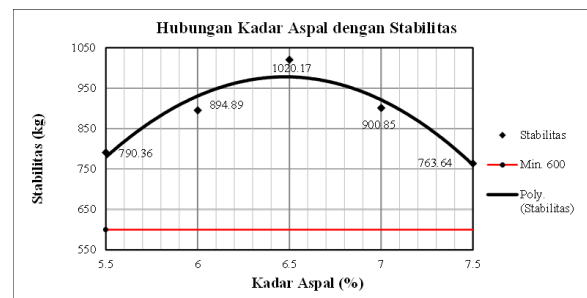
Komponen	Komposisi Agregat	Kadar Aspal Rencana (%)				
		5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Batu Pecah 3/4"	15%	14,18	14,10	14,03	13,95	13,88
Batu Pecah 1/2"	35%	33,08	32,90	32,73	32,55	32,38
Abu Batu	48%	45,36	45,12	44,88	44,64	44,40
Filler (Semen)	2%	1,89	1,88	1,87	1,86	1,85
Total Agregat Campuran (%)	100%	94,50	94,00	93,50	93,00	92,50
Total Campuran (%)		100	100	100	100	100

Komposisi Campuran	Berat Timbangan (gr)					
Kadar Aspal Rencana	%	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Batu Pecah 3/4"	Gram	170,10	169,20	168,30	167,40	166,60
Batu Pecah 1/2"	Gram	396,90	394,80	392,70	390,60	388,50
Abu Batu	Gram	544,32	541,44	538,56	535,68	532,80
Filler (Semen)	Gram	22,68	22,56	22,44	22,32	22,20
Berat Agregat Campuran (gr)		1134,00	1128,00	1122,00	1116,00	1110,00
Berat Aspal (gr)		66,00	72,00	78,00	84,00	90,00
Berat Rencana Total Campuran (gr)		1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Tabel 2. Rangkuman Hasil Pengujian Marshall

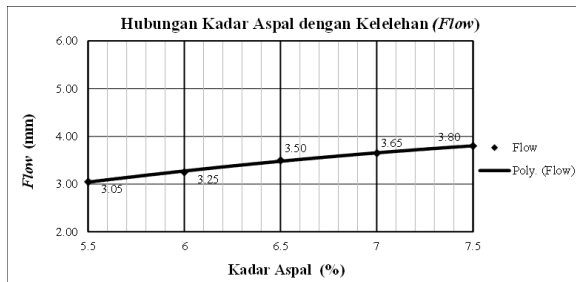
Kadar Aspal (%)	Benda Uji	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VMA (%)	VIM (%)	VFA (%)	Kepadatan (gr/cm ³)
		Min. 600	-	Min. 250	Min. 17	Min. 3-5	Min. 68	-
5,5	A	778,91	3,10	251,26	18,34	6,50	64,53	2,27
	B	801,82	3,00	267,27	18,34	6,50	64,54	2,27
	Rata-Rata	790,36	3,05	259,27	18,34	6,50	64,54	2,27
6,0	A	930,68	3,20	290,84	18,19	5,15	71,68	2,290
	B	859,09	3,30	260,33	18,10	5,06	72,08	2,292
	Rata-Rata	894,89	3,25	275,58	18,14	5,10	71,88	2,291
6,5	A	1014,20	3,60	281,72	18,22	4,00	78,02	2,301
	B	1026,13	3,40	301,80	18,25	4,04	77,88	2,300
	Rata-Rata	1020,17	3,50	291,76	18,23	4,02	77,95	2,301
7,0	A	906,82	3,50	259,09	18,30	2,89	84,18	2,311
	B	894,89	3,80	235,50	18,25	2,84	84,46	2,313
	Rata-Rata	900,85	3,65	247,29	18,27	2,87	84,32	2,312
7,5	A	775,57	3,10	250,18	18,44	1,85	89,96	2,320
	B	751,50	4,50	167,05	18,48	1,90	89,72	2,318
	Rata-Rata	763,64	3,80	208,61	18,46	1,88	89,84	2,319

Setelah hasil pengujian Marshall diperoleh, langkah selanjutnya adalah membuat grafik hubungan kadar aspal dengan parameter-parameter Marshall untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO).



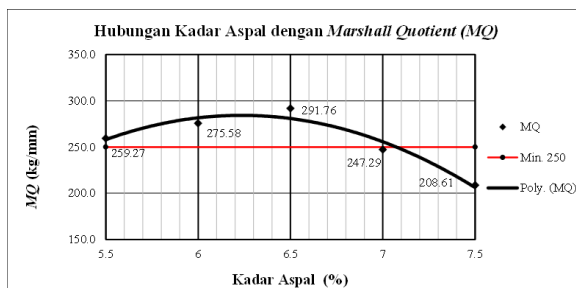
Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan lapis keras untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk [14], [15]. Berdasarkan hasil pengujian, stabilitas meningkat dengan bertambahnya kadar aspal dari 5,5% (790,36 kg) hingga 6,5% (1020,17 kg). Namun, pada kadar aspal 7,0% (900,85 kg) dan 7,5% (763,64 kg), stabilitas kembali menurun. Kenaikan stabilitas disebabkan oleh bertambahnya kadar aspal yang menyelimuti agregat, meningkatkan kohesi dan *interlocking* antar agregat. Penurunan stabilitas terjadi karena kelebihan aspal berfungsi sebagai pelicin setelah melewati batas optimum, menyebabkan turunnya stabilitas campuran.



Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Flow

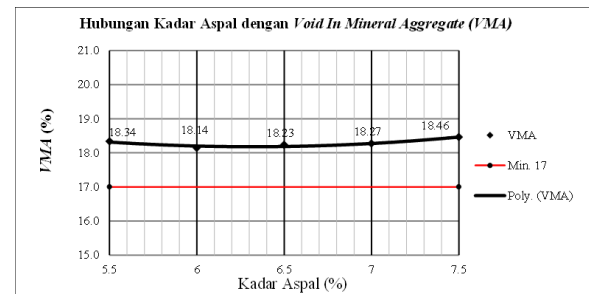
Kelelahan (*flow*) adalah besarnya deformasi vertikal benda uji pada awal pembebanan yang menunjukkan durabilitas lapis perkerasan [16], [17]. Berdasarkan pengujian, semakin tinggi kadar aspal, semakin tinggi nilai *flow*. Pada kadar aspal 5,5% nilai *flow* = 3,05 mm, pada 6,0% = 3,25 mm, pada 6,5% = 3,50 mm, pada 7,0% = 3,65 mm, dan pada 7,5% = 3,80 mm. Peningkatan nilai *flow* seiring bertambahnya kadar aspal membuat lapis perkerasan lebih plastis dan mudah berubah bentuk. Sebaliknya, nilai *flow* yang rendah menyebabkan campuran menjadi kaku dan mudah retak.



Gambar 5. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Marshall Quotient (MQ)

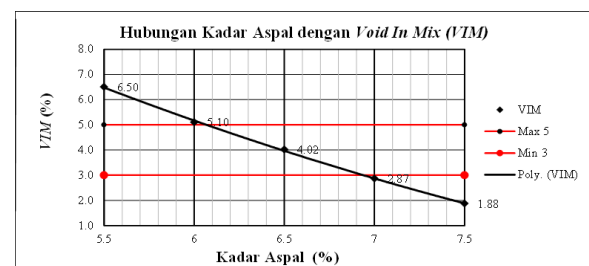
Marshall Quotient (MQ) adalah rasio antara stabilitas dan *flow* [18]. Jika kadar aspal meningkat, hal ini mempengaruhi fleksibilitas dan kelenturan campuran. Nilai MQ sebanding dengan stabilitas dan berbanding terbalik dengan *flow*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kadar aspal 5,5% (MQ = 259,27 kg/mm), 6,0% (MQ = 275,58 kg/mm), dan 6,5% (MQ = 291,76 kg/mm), nilai MQ meningkat, menunjukkan campuran yang kuat tetapi berpotensi retak karena stabilitas tinggi dan *flow* rendah. Pada kadar aspal 7,0% (MQ = 247,29 kg/mm) dan 7,5% (MQ = 208,61 kg/mm), nilai MQ menurun, menunjukkan campuran rentan terhadap deformasi permanen karena stabilitas rendah dan *flow* tinggi. Nilai

MQ pada kadar aspal 5,5% sampai 6,5% memenuhi spesifikasi minimum 250 kg/mm.



Gambar 6. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Void in Mineral Aggregate (VMA)

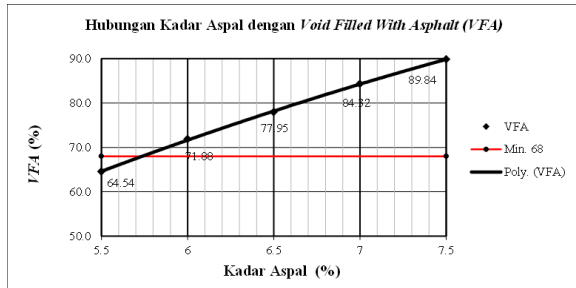
Void in the Mineral Aggregate (VMA) adalah rongga udara antar butir agregat dalam campuran aspal, termasuk rongga udara dan kadar aspal efektif, dinyatakan dalam persen terhadap total volume [19]. Berdasarkan pengujian, nilai VMA menurun dari 18,34% pada kadar aspal 5,5% menjadi 18,14% pada kadar aspal 6,0% karena lebih banyak aspal mengisi rongga agregat. Setelah mencapai kadar aspal optimum, nilai VMA meningkat karena film aspal yang lebih tebal meningkatkan jarak antar agregat. Peningkatan VMA terlihat pada kadar aspal 6,5% (18,23%), 7,0% (18,27%), dan 7,5% (18,46%). Nilai VMA yang tinggi dapat membuat lapis perkerasan lebih fleksibel.



Gambar 7. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Void in the Mix (VIM)

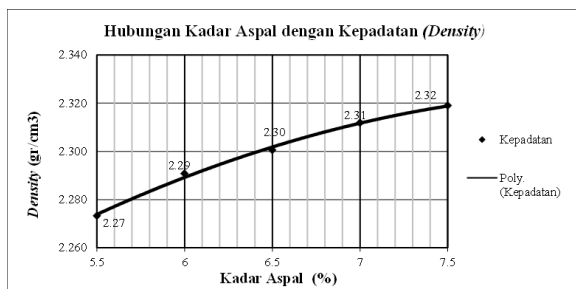
Void in Mix (VIM) adalah persentase rongga udara dalam total campuran aspal [20]. Berdasarkan pengujian, nilai VIM berbanding terbalik dengan kadar aspal. Pada kadar aspal 5,5%, VIM sebesar 6,50%, menurun menjadi 5,10% pada 6,0%, 4,02% pada 6,5%, 2,87% pada 7,0%, dan 1,88% pada 7,5%. Semakin tinggi kadar aspal, semakin kecil rongga udara dalam campuran karena aspal mengisi lebih banyak rongga antar agregat. Sebaliknya, kadar

aspal yang rendah menyebabkan VIM lebih tinggi, yang dapat mengakibatkan kelelahan lebih cepat. VIM optimal sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 tercapai pada kadar aspal 6,5% (min. 3%, maks. 5%).



Gambar 8. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Void Filled with Asphalt (VFA)

VFA (*Void Filled with Asphalt*) adalah persentase rongga yang terisi aspal setelah pemadatan [21]. Pengujian menunjukkan nilai VFA meningkat dengan penambahan kadar aspal: 5,5% (64,54%), 6,0% (71,88%), 6,5% (77,95%), 7,0% (84,32%), dan 7,5% (89,94%). Peningkatan ini disebabkan aspal mengisi lebih banyak rongga antar butiran agregat. Pada kadar aspal 5,5%, nilai VFA tidak memenuhi spesifikasi minimum 68%, sedangkan pada kadar aspal 6,0% hingga 7,5%, semua memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.



Gambar 9. Grafik Hubungan Kadar Aspal Terhadap Nilai Kepadatan

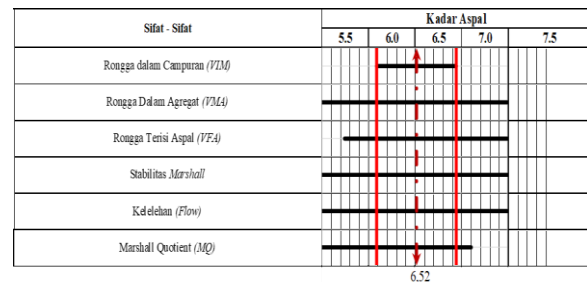
Density adalah tingkat kerapatan campuran setelah dipadatkan, menunjukkan kualitas pemadatan [22]. Hasil pengujian menunjukkan nilai *density* meningkat dengan penambahan kadar aspal: 5,5% (2,27 g/cm³), 6,0% (2,29 g/cm³), 6,5% (2,30 g/cm³), 7,0% (2,31 g/cm³), dan 7,5% (2,32 g/cm³). Peningkatan kadar aspal mengisi lebih banyak rongga, membuat campuran lebih padat. Namun, kelebihan aspal

dapat membuat campuran plastis dan rentan terhadap deformasi dan *bleeding*.

3.3 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar Aspal Optimum (KAO) adalah nilai rata-rata dari rentang kadar aspal yang memenuhi semua spesifikasi campuran seperti stabilitas, flow, *Marshall Quotient* (MQ), VIM, VMA, VFA, dan kepadatan [23]. Penentuan KAO dilakukan dengan membuat diagram batang dari hasil pengujian Marshall, kemudian mencari titik tengah rentang kadar aspal yang sesuai dengan semua persyaratan dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Diagram batang yang dihasilkan dapat dilihat pada **Gambar 10**.

Dalam proses penentuan KAO, diagram batang digunakan untuk menggambarkan hasil pengujian Marshall. Titik tengah rentang kadar aspal yang memenuhi semua persyaratan tersebut kemudian ditetapkan sebagai Kadar Aspal Optimum. Proses ini memastikan bahwa KAO dipilih berdasarkan hasil pengujian yang menunjukkan performa terbaik untuk semua parameter yang diukur. Diagram batang membantu visualisasi data sehingga memudahkan dalam menentukan kadar aspal yang paling memenuhi kriteria.



Gambar 10. Diagram Batang Kadar Aspal Optimum

Pada diagram di atas, nilai kadar aspal minimum (a) ditemukan sebesar 6,09%, sedangkan nilai kadar aspal maksimum (b) tercatat sebesar 6,95%. Nilai tengah dari kedua rentang kadar aspal tersebut dihitung menggunakan persamaan matematika $(a+b)/2$ sehingga diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 6,52%.

3.4 Rancang Benda Uji Berdasarkan Kadar Aspal Optimum (KAO), Pemadatan

Benda Uji dengan Variasi Tumbukan 2 x 40, 2 x 50, 2 x 60, dan 2 x 70 Tumbukan, dan Pengujian Marshall Tahap II

Setelah kadar aspal optimum sebesar 6,52% diperoleh dari hasil pemadatan awal, langkah berikutnya adalah menggunakan nilai ini untuk menentukan komposisi campuran benda uji. Campuran ini kemudian akan dipadatkan dengan variasi tumbukan yaitu 2 x 40 tumbukan, 2 x 50 tumbukan, 2 x 60 tumbukan, dan 2 x 70 tumbukan. Masing-masing variasi pemadatan ini dilakukan pada 2 benda uji, sehingga totalnya ada 8 benda uji. Setelah benda uji dibuat, proses pemadatan dilakukan menggunakan alat Manual Marshall Compactor dengan variasi jumlah tumbukan seperti yang disebutkan diatas. Hasil dari pengujian Marshall dengan variasi jumlah tumbukan ini tercantum pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Rangkuman Hasil Pengujian Marshall Berdasarkan Variasi Jumlah Tumbukan

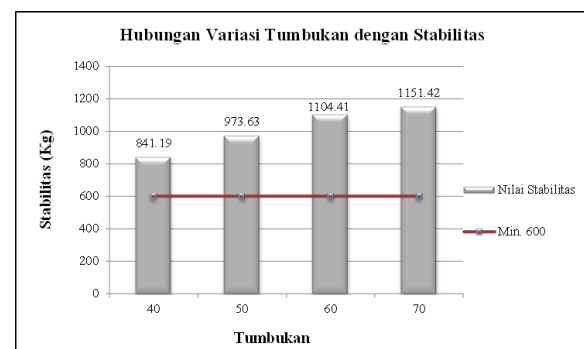
Jumlah Tumbukan	Benda Uji	Stabilitas	Flow	MQ	VMA	VIM	VFA	Kepadatan
		(kg)	(mm)	(kg/mm)	(%)	(%)	(%)	(gr/cm ³)
		Min. 600	-	Min. 250	Min. 17	Min. 3-5	Min. 68	-
2 x 40 Tumbukan	A	847,16	3,50	242,05	19,26	5,18	73,11	2,27
	B	835,23	3,40	245,65	19,34	5,26	72,77	2,27
	Rata-Rata	841,19	3,45	243,85	19,30	5,22	72,94	2,27
2 x 50 Tumbukan	A	962,18	3,32	289,81	18,24	3,97	78,21	2,27
	B	985,09	3,40	289,73	18,35	4,10	77,64	2,27
	Rata-Rata	973,63	3,36	289,77	18,29	4,04	77,92	2,30
2 x 60 Tumbukan	A	1092,00	3,30	330,91	17,46	3,06	82,48	2,32
	B	1116,82	3,40	343,64	17,30	2,88	83,37	2,33
	Rata-Rata	1104,41	3,28	337,21	17,38	2,97	82,93	2,325
2 x 70 Tumbukan	A	1133,52	3,20	354,24	16,72	2,19	86,90	2,34
	B	1169,32	3,15	371,21	17,31	2,89	83,31	2,33
	Rata-Rata	1151,42	3,18	362,72	17,02	2,54	85,10	2,335

Berdasarkan hasil pengujian Marshall pada **Tabel 3** setelah variasi jumlah tumbukan, diketahui bahwa seluruh Parameter Marshall pada 2 x 50 tumbukan memenuhi Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Untuk pemadatan dengan 2 x 40 tumbukan, nilai MQ tidak mencapai standar yang ditetapkan dan nilai VIM melebihi batas maksimum. Sedangkan pada jumlah tumbukan 2 x 60 dan 2 x 70, nilai VIM berada di bawah batas minimum yang diizinkan.

Dalam variasi tumbukan 2 x 50, semua parameter seperti stabilitas, flow, MQ, VIM, VMA, VFA, dan kepadatan sesuai dengan spesifikasi yang berlaku. Namun, pemadatan 2 x 40 tumbukan menunjukkan kekurangan di dua aspek: MQ lebih rendah dari yang dipersyaratkan dan VIM yang melampaui batas maksimum, menandakan campuran terlalu berpori dan tidak cukup padat. Sebaliknya, pemadatan dengan 2 x 60 dan 2 x 70 tumbukan menghasilkan VIM yang lebih rendah dari batas minimum, menunjukkan campuran menjadi terlalu padat dan kurang fleksibel.

3.5 Analisa Pengaruh Variasi Tumbukan dan Pembahasannya

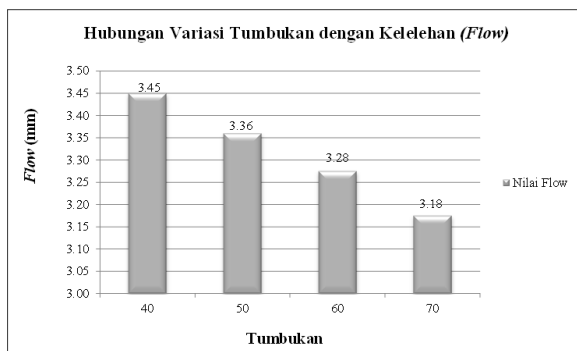
Dalam penelitian ini, variasi tumbukan yang diterapkan pada pemadatan campuran aspal bertujuan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap sifat-sifat fisik dan mekanik campuran. Pemadatan merupakan faktor penting yang mempengaruhi kualitas dan kinerja perkerasan aspal. Variasi jumlah tumbukan dapat menghasilkan perbedaan dalam kepadatan, kekuatan, dan fleksibilitas campuran. Oleh karena itu, analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana perubahan dalam jumlah tumbukan dapat mempengaruhi parameter-parameter Marshall, seperti stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void in the Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), Marshall Quotient (MQ) dan Kepadatan. Grafik hubungan variasi tumbukan terhadap parameter Marshall seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 11. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Stabilitas

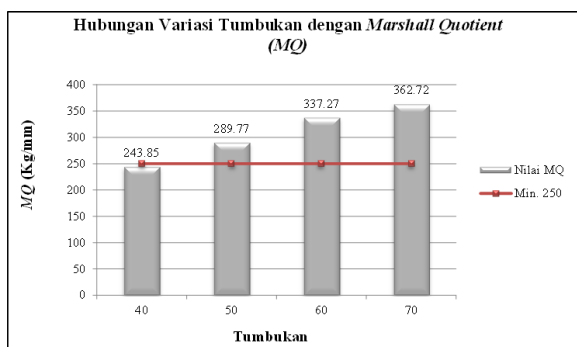
Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 11**, terlihat bahwa nilai stabilitas meningkat dengan bertambahnya jumlah tumbukan dan menurun jika jumlah tumbukan berkurang. Stabilitas pada 2 x 50 tumbukan =

973,63 kg, turun pada 2 x 40 tumbukan = 841,19 kg, menunjukkan penurunan 15,74%. Stabilitas rendah menunjukkan kerapatan campuran berkurang, mengurangi *interlocking* agregat. Stabilitas meningkat pada 2 x 60 tumbukan = 1104,41 kg (naik 13,43%) dan 2 x 70 tumbukan = 1151,42 kg (naik 4,26%), menunjukkan kerapatan dan *interlocking* yang lebih baik. Semua nilai stabilitas memenuhi spesifikasi minimum Bina Marga 2018 Revisi 2 sebesar 600 kg.



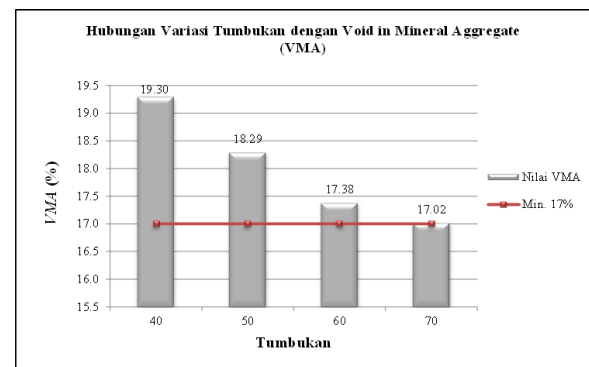
Gambar 12. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Flow

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 12**, nilai *flow* meningkat jika jumlah tumbukan berkurang dan menurun jika jumlah tumbukan bertambah. Pada 2 x 40 tumbukan, nilai *flow* mencapai 3,45 mm, menunjukkan kerapatan campuran berkurang dan banyak rongga, sehingga mudah berubah bentuk seperti gelombang. Sebaliknya, nilai *flow* menurun pada 2 x 50 tumbukan (3,36 mm), 2 x 60 tumbukan (3,28 mm), dan 2 x 70 tumbukan (3,18 mm), menunjukkan kerapatan yang lebih baik. *Flow* yang rendah mengindikasikan campuran menjadi kaku dan lebih rentan retak.



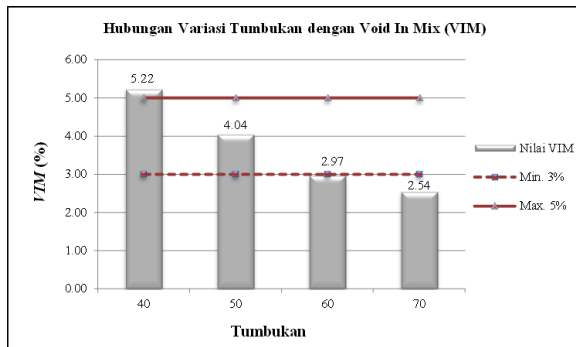
Gambar 13. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Marshall Quotient (MQ)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 13**, nilai *Marshall Quotient* (MQ) menurun saat jumlah tumbukan dikurangi dan meningkat saat jumlah tumbukan ditambah. Pada 2 x 40 tumbukan, nilai MQ adalah 243,85 kg/mm, rendah dan di bawah batas yang disyaratkan, menunjukkan campuran lebih fleksibel dan plastis. Sebaliknya, nilai MQ meningkat pada 2 x 50 tumbukan (289,77 kg/mm), 2 x 60 tumbukan (337,27 kg/mm), dan 2 x 70 tumbukan (362,72 kg/mm), menunjukkan campuran menjadi lebih kaku dan rentan retak.



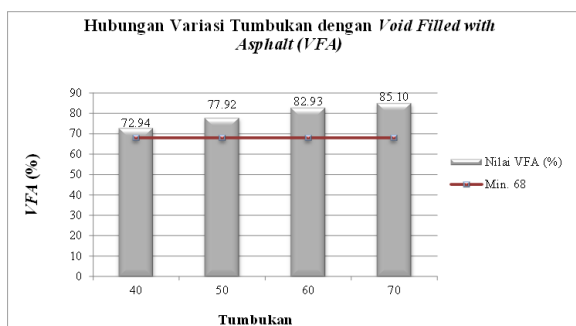
Gambar 14. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Void in the Mineral Aggregate (VMA)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 14**, terlihat bahwa nilai VMA meningkat saat jumlah tumbukan dikurangi dan menurun saat jumlah tumbukan ditambah. Pada 2 x 40 tumbukan, nilai VMA adalah 19,30%, menunjukkan banyak rongga udara antar agregat. Saat jumlah tumbukan ditambah, nilai VMA turun menjadi 18,29% (2 x 50), 17,38% (2 x 60), dan 17,02% (2 x 70). Ini menunjukkan campuran menjadi lebih rapat dengan lebih sedikit rongga udara. Semua variasi jumlah tumbukan memenuhi syarat minimum VMA sebesar 17% sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.



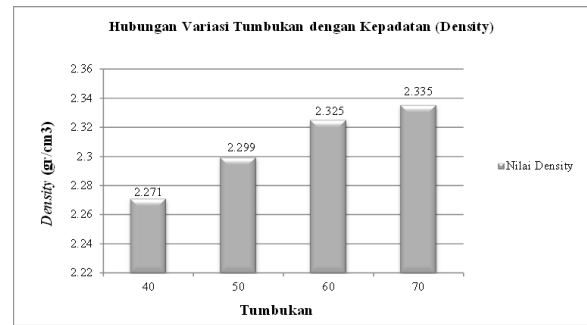
Gambar 15. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Void in Mix (VIM)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 15**, nilai VIM menurun dengan bertambahnya jumlah tumbukan dan meningkat saat jumlah tumbukan dikurangi. Pada 2 x 40 tumbukan, nilai VIM tinggi yaitu 5,22%, menunjukkan banyak rongga dalam campuran. Saat jumlah tumbukan ditambah, nilai VIM turun menjadi 4,04% (2 x 50), 2,97% (2 x 60), dan 2,54% (2 x 70). Nilai VIM rendah menunjukkan campuran lebih rapat. Hanya tumbukan 2 x 50 yang memenuhi rentang batas yang disyaratkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.



Gambar 16. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Void Filled with Asphalt (VFA)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 16**, nilai VFA dipengaruhi oleh jumlah tumbukan. Pada 2 x 40 tumbukan, nilai VFA adalah 72,94%. Saat jumlah tumbukan dinaikkan, nilai VFA meningkat menjadi 77,92% (2 x 50), 82,93% (2 x 60), dan 85,10% (2 x 70). VFA tinggi berarti lebih banyak rongga diisi aspal, meningkatkan kedapatan campuran terhadap air dan udara. Namun, VFA terlalu tinggi dapat menyebabkan bleeding. Semua variasi tumbukan memenuhi nilai batas minimum VFA yang disyaratkan.



Gambar 17. Grafik Hubungan Variasi Tumbukan Terhadap Nilai Kepadatan (Density)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Gambar 17**, nilai kepadatan campuran meningkat seiring dengan peningkatan jumlah tumbukan. Pada 2 x 40 tumbukan, nilai kepadatan adalah 2,271 gr/cm³, meningkat menjadi 2,299 gr/cm³ (2 x 50), 2,325 gr/cm³ (2 x 60), dan 2,335 gr/cm³ (2 x 70). Semakin padat campuran, semakin baik kemampuannya menahan beban dan semakin kedap terhadap air dan udara. Sebaliknya, jumlah tumbukan yang sedikit menyebabkan penurunan kepadatan campuran, meningkatkan risiko terbentuknya alur.

4. IMPLIKASI HASIL STUDI

Hasil studi tentang karakteristik campuran aspal memiliki implikasi yang signifikan dalam menangani berbagai persoalan kemanusiaan dan meningkatkan kemampuan manusia dalam mempertahankan kualitas hidupnya. Dengan memahami bagaimana komposisi aspal dan proses pemadatan memengaruhi sifat-sifat campuran, kita dapat mengembangkan teknik konstruksi jalan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Infrastruktur jalan yang berkualitas dapat meningkatkan mobilitas masyarakat, mempercepat pertumbuhan ekonomi, dan meningkatkan aksesibilitas terhadap layanan kesehatan, pendidikan, dan pasar kerja. Hal ini pada gilirannya akan membantu mengurangi biaya perawatan jalan, meningkatkan keamanan pengguna jalan, serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan demikian, penerapan temuan dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kualitas hidup masyarakat secara keseluruhan dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa variasi jumlah tumbukan signifikan mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanik campuran aspal. Berikut adalah beberapa poin penting yang diperoleh dari penelitian ini:

1. Stabilitas: Nilai stabilitas campuran meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah tumbukan. Stabilitas tertinggi dicapai pada 2 x 70 tumbukan, yang menunjukkan peningkatan kepadatan dan *interlocking* agregat yang lebih baik. Semua variasi memenuhi spesifikasi minimum yang disyaratkan.
2. *Flow*: Nilai *flow* menurun dengan bertambahnya jumlah tumbukan. *Flow* terendah tercapai pada 2 x 70 tumbukan, menunjukkan campuran menjadi lebih kaku dan kurang fleksibel.
3. Marshall Quotient (MQ): Nilai MQ meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah tumbukan, menunjukkan peningkatan kekakuan campuran. Nilai MQ tertinggi dicapai pada 2 x 70 tumbukan.
4. *Void in the Mineral Aggregate* (VMA): Nilai VMA menurun dengan bertambahnya jumlah tumbukan, menunjukkan campuran menjadi lebih rapat dengan lebih sedikit rongga udara. Semua variasi jumlah tumbukan memenuhi syarat minimum VMA yang disyaratkan.
5. *Void in Mix* (VIM): Nilai VIM menurun seiring dengan bertambahnya jumlah tumbukan. VIM terendah dicapai pada 2 x 70 tumbukan, menunjukkan peningkatan kepadatan campuran. Hanya variasi tumbukan 2 x 50 yang memenuhi rentang batas yang disyaratkan.
6. *Void Filled with Asphalt* (VFA): Nilai VFA meningkat dengan bertambahnya jumlah tumbukan, menunjukkan peningkatan kekedapan campuran terhadap air dan udara. Semua variasi jumlah tumbukan memenuhi nilai batas minimum VFA yang disyaratkan.
7. *Density*: Nilai kepadatan campuran meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah tumbukan. Kepadatan tertinggi dicapai pada 2 x 70 tumbukan, menunjukkan kemampuan campuran untuk menahan beban yang lebih baik dan kedap terhadap air dan udara.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Razi and I. E. K. P. Sumberdaya, "Peranan Transportasi Dalam Perkembangan Suatu Wilayah," *Academia*. Available at: https://www.academia.edu/download/36557534/Makalah_Ekonomi_Regional_Muhammad_Razi_41203401130016_UNB.pdf, 2014.
- [2] M. C. Siahay et al., *Pembangunan Infrastruktur di Indonesia*. TOHAR MEDIA, 2023.
- [3] J. E. Waani, "Evaluasi Volumetrik Marshall Campuran AC-BC (Studi Kasus Material Agregat di Manado dan Minahasa)," *Jurnal Teknik Sipil ITB*, vol. 20, no. 1, pp. 67–78, 2013.
- [4] I. Irianto et al., "Perancangan Perkerasan Jalan." Yayasan Kita Menulis, 2021.
- [5] A. K. Lubis, D. Kumalasari, and A. Nurdin, "Pengaruh Variasi Jumlah Lintasan Pemadatan Terhadap Kepadatan Perkerasan Asphalt Concrete Binder Course," *Jurnal Talenta Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 85–92, 2022.
- [6] A. A. Alamsyah and A. A. Darmawan, "Pengaruh Variasi Pemadatan Terhadap Karakteristik Marshall dengan Menggunakan Wood Ash Sebagai Filler pada Campuran Laston," *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, vol. 24, no. 1, pp. 564–570, 2024.
- [7] M. E. Putri and A. Raydiyarto, "KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL HRS-WC DENGAN PENAMBAHAN LIMBAH PLASTIK POLYPROPYLENE (PP)," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*, 2023, pp. 285–294.
- [8] D. P. Umum, "SNI 03-6889-2002," *Tata Cara Pengambilan Contoh Agregat*, 2002.
- [9] B. S. Nasional, "SNI 1969: 2016 Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar," *Jakarta: Badan Standardisasi Nasional*, 2016.
- [10] B. S. Nasional, "SNI 2417-2008 Cara Uji Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi

- Los Angeles,” *Kementrian Pekerjaan Umum, Badan Penelitian dan Pengembangan PU*, 2008.
- [11] B. S. Nasional, “SNI ASTM C136: 2012: Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar,” *Jakarta: BSN*, 2012.
- [12] M. L. A. M. Makin, E. Kalogo, and K. R. Bela, “PENGARUH VARIASI JUMLAH TUMBUKAN TERHADAP NILAI MARSHALL HASIL PEMADATAN PADA ASPAL HRS-WC SECARA MANUAL DAN ELEKTRIK,” *Eternitas: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 27–37, 2023.
- [13] M. K. I. M. Milo, E. Kalogo, and K. R. Bela, “PERBANDINGAN KARAKTERISTIK MARSHALL PADA CAMPURAN ASPAL PANAS LAPIS BETON LAPIS ANTARA MENGGUNAKAN AGREGAT UKURAN 25 mm DAN AGREGAT UKURAN 19 mm,” *Eternitas: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 3, no. 1, pp. 31–43, 2023.
- [14] F. E. Lapien and H. Nauw, “KAJIAN PENGGUNAAN LATASIR PADA LAPIS PERKERASAN JALAN KAMPUNG SUWIAM-FATEGOMI KABUPATEN MAYBRAT PROPINSI PAPUA BARAT,” *Jurnal PORTAL SIPIL*, vol. 6, no. 2, pp. 29–39, 2017.
- [15] A. Hasan and S. Sumiati, “Pengaruh Penggunaan Batu Kapur Sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Campuran Aspal Beton (AC-BC),” *PILAR*, vol. 10, no. 2, 2014.
- [16] A. T. Apriawan, “Analisis karakteristik Marshall pada aspal beton campuran panas dengan bahan tambah asbuton butir,” 2010.
- [17] B. Edison, “Karakteristik Campuran Aspal Panas (Asphalt Concrete-Binder Course) Menggunakan Aspal Polimer,” *Jurnal Aptek*, vol. 2, no. 1, pp. 60–71, 2014.
- [18] L. C. Lagonda, O. H. Kaseke, and S. V. Pandey, “kajian hubungan batasan kriteria Marshall Quotient dengan ratio partikel lolos saringan no.# 200–bitumen efektif pada campuran jenis laston,” *Jurnal Sipil Statik*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [19] L. Sriharyani and A. Tholib, “Perubahan Parameter Marshall Akibat Perbedaan Jumlah Tumbukan pada Asphalt Concrete-Binder Coarse (AC-BC) Gradasi Kasar,” *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 53–65, 2019.
- [20] H. W. Wardana, P. Mahardi, and Y. Risdianto, “Penentuan Kadar Aspal Optimum (Kao) Dalam Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc) Dengan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat,” *Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 1, no. 2, 2020.
- [21] Y. P. A. Rumbyarso and R. B. Ulum, “Analisis Pengaruh Penggunaan Cangkang Telur Bebek Ras Petelur Sebagai Filler Pada Campuran Aspal Beton,” *Jurnal Teknologika*, vol. 11, no. 2, pp. 115–124, 2021.
- [22] D. I. Pau and Y. N. Sentis, “Variasi Pasir Gunung Sebagai Bahan Campuran Perkerasan Asphalt Concrete Terhadap Kualitas Perkerasan Jalan,” *SIARTEK*, vol. 3, no. 1, pp. 33–42, 2017.
- [23] C. Nurkandi, H. Ashad, and A. Massara, “Studi Experimental Campuran Ac-Wc dengan Polimer Elvaloy Terhadap Nilai Modulus Elastis dan Angka Poison dengan Variasi Suhu Campuran,” *Innovative: Journal Of Social Science Research*, vol. 3, no. 3, pp. 5016–5031, 2023.