21 (2) (2026) 211-224

Teknika

http://journals.usm.ac.id/index.php/teknika

Analisis Pengaruh Suhu Campuran Beraspal dan Faktor Pemadatan pada Campuran Aspal PG70

Ahmad Kholisun[1], Wiji Lestarini[2], Agus Juara[3], Joko Adi Wicaksono[4]✉, Hanna Nursanti Sukmantari[5], Talitha Zhafira[6], Alif Harnianto Putra[7], Slamet Budirahardjo[8], Mimin Aminah Yusuf[9]

[1,2,3,4,5] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sains Al-Qur'an, Wonosobo, Indonesia
[6] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Semarang, Semarang, Indonesia
[7] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Nahdlatul Ulama, Jepara, Indonesia
[8] Program Studi Teknik Sipil, Universitas PGRI Semarang, Semarang, Indonesia
[9] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Darul 'Ulum, Lamongan, Indonesia

DOI: https://doi.org/10.26623/teknika.v21i1.14082

Info Artikel

Sejarah Artikel:
Disubmit 06 Maret 2026
Direvisi 31 Oktober 2026
Disetujui 31 Oktober 2026

Keywords:
Asphalt concrete; Coarse Aggregate; Fine Aggregate; Marshall Quotient parameters; Mixing temperature

Abstrak

Aspal beton merupakan campuran antara agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), dan aspal sebagai bahan pengikat yang diproduksi pada suhu tertentu untuk menghasilkan kinerja perkerasan jalan yang optimal. Suhu pencampuran menjadi faktor penting karena sangat memengaruhi homogenitas campuran, *workability*, serta nilai karakteristik *Marshall*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pencampuran terhadap karakteristik campuran AC-BC dan menentukan suhu optimum yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimen dengan variasi suhu pencampuran 140℃, 150℃, 160℃, 170℃, dan 180℃. Tahapan penelitian meliputi pemeriksaan sifat fisik agregat dan aspal PG-70, perancangan campuran, serta pengujian berat jenis, *Gmm*, dan Marshall yang mencakup parameter stabilitas, flow, *VIM*, *VMA*, *VFA*, dan *Marshall Quotient*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu 170℃ menghasilkan kinerja terbaik dengan nilai *VIM* 3,13%, *VMA* 17,49%, *VFA* 82,08%, flow 3,42 mm, *Marshall Quotient* 702,8 kg/mm, dan stabilitas 2407 kg. Suhu 160℃ juga memenuhi spesifikasi, sedangkan suhu 140℃, 150℃, dan 180℃ belum memenuhi persyaratan. Dengan demikian, pengendalian suhu pencampuran sangat berpengaruh terhadap mutu campuran beraspal dan diperlukan ketelitian dalam proses produksi untuk memperoleh hasil yang optimal.

Abstract

Asphalt concrete is a mixture of coarse aggregate, fine aggregate, filler, and asphalt binder produced at a specific temperature to achieve optimal pavement performance. Mixing temperature is a critical factor because it significantly affects the homogeneity, workability, and Marshall characteristics of the mixture. This study aims to analyze the effect of mixing temperature variations on the characteristics of AC-BC mixtures and to determine the optimum temperature that meets the 2018 Bina Marga General Specifications. The research method used was an experimental approach with mixing temperature variations of 140℃, 150℃, 160℃, 170℃, and 180℃. The research stages included testing the physical properties of coarse and fine aggregates and PG-70 asphalt binder, mix design preparation, and laboratory testing consisting of specific gravity, Gmm, and Marshall tests, including stability, flow, VIM, VMA, VFA, and Marshall Quotient parameters. The results showed that the

optimum mixing temperature was 170°C, producing VIM of 3.13%, VMA of 17.49%, VFA of 82.08%, flow of 3.42 mm, Marshall Quotient of 702.8 kg/mm, and stability of 2407 kg. The 160°C variation also met the required specifications, while the 140°C, 150°C, and 180°C variations did not fully satisfy the standards. Therefore, proper control of mixing temperature plays a significant role in ensuring the quality and performance of asphalt concrete mixtures, and careful production processes are essential to achieve optimal results.

This is an open access article under the CC BY license

✉ **Alamat Korespondensi:**
E-mail: joko@fastikom-unsiq.ac.id

p-ISSN 1410-4202
e-ISSN 2580-8478

PENDAHULUAN

Prasarana perhubungan merupakan faktor penting dalam mendukung perkembangan ekonomi, wilayah dan budaya suatu daerah karena berperan dalam meningkatkan konektivitas dan pertumbuhan kawasan. Jalan sebagai salah satu bentuk infrastruktur transportasi memiliki fungsi strategis dalam menunjang distribusi barang dan jasa serta mobilitas penduduk. Oleh karena itu, kualitas jalan harus direncanakan dan dibangun dengan baik agar mampu memberikan pelayanan yang optimal melalui struktur perkerasan yang kuat, stabil, dan tahan lama sesuai umur rencana (Poerwodihardjo et al., 2023). Salah satu aspek penting dalam mencapai tujuan tersebut adalah pemilihan sistem perkerasan dan material penyusunnya yang sesuai dengan kondisi lingkungan, karakteristik tanah dasar, serta beban lalu lintas yang bekerja. Pada perkerasan lentur, kinerja struktural dan fungsional sangat dipengaruhi oleh interaksi antara agregat, aspal, karakteristik campuran dan kualitas pada saat pelaksanaan konstruksi. Karakteristik campuran aspal, termasuk sifat bahan pengikat dan komposisi campuran, berhubungan dengan perilaku perkerasan terhadap beban dan kerusakan yang terjadi selama masa pelayanan (Abu Abdo & Jung, 2016). Kinerja perkerasan yang memadai memerlukan kesesuaian antara pemilihan bahan, desain campuran, desain struktural, dan kualitas konstruksi *(Federal Highway Administration, 2012)*. Dengan demikian, keberhasilan pekerjaan jalan tidak cukup dinilai berdasarkan terpenuhinya persyaratan material pada tahap perencanaan, tetapi juga berdasarkan stabilitas, durabilitas dan ketahanan terhadap deformasi selama pembebanan berulang. Dalam konteks tersebut, penelitian terhadap karakteristik campuran aspal menjadi penting untuk menghasilkan dasar perencanaan teknis, termasuk pemilihan material dan pengendalian pekerjaan perkerasan.

Salah satu jenis perkerasan yang banyak digunakan adalah perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu sistem perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Pada perkerasan lentur, lapis aspal beton (laston) merupakan jenis lapisan yang umum diterapkan. Laston terdiri atas campuran agregat dan aspal dengan gradasi menerus yang dicampur, dihamparkan, dan dipadatkan pada suhu tertentu sehingga memiliki nilai struktural yang memadai (Intari et al., 2018). Lapisan aspal beton adalah lapisan konstruksi jalan yang tersusun dari campuran aspal keras dan agregat yang dicampur dalam kondisi panas serta dipadatkan pada suhu tertentu. Lapisan ini terdiri atas tiga jenis, yaitu *Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC), Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC),* dan *Asphalt Concrete – Base (AC-Base)* (Tahir & Setiawan, 2009). Lapisan *AC-BC* merupakan lapisan pondasi atas yang terletak di antara lapis pondasi (*base course*) dan lapis aus (*wearing course*), dengan gradasi agregat rapat dan umumnya digunakan pada jalan dengan beban lalu lintas berat. Lapisan *AC-BC* berfungsi sebagai lapisan antara yang membantu mendistribusikan beban dari lapisan permukaan menuju lapisan di bawahnya. Akibat pengaruh pembebanan berulang dan perubahan temperatur, karakteristik campuran *AC-BC* harus mampu mempertahankan stabilitas serta ketahanan terhadap deformasi. Perubahan temperatur pencampuran dan kondisi pemadatan dapat mempengaruhi karakteristik

Marshall campuran *AC-BC* (Yani et al., 2023). Hasil ini memperlihatkan bahwa kualitas lapisan antara tidak hanya ditentukan oleh komposisi agregat dan kadar aspal, tetapi juga oleh kondisi proses produksi dan pemadatan. Oleh sebab itu, evaluasi temperatur pencampuran merupakan bagian penting dari pengendalian mutu campuran *AC-BC*, terutama ketika digunakan bahan pengikat dengan karakteristik kinerja temperatur tinggi. Ketentuan teknis mengenai campuran beraspal panas saat ini mengacu pada spesifikasi umum Bina Marga 2018 yang mengatur persyaratan volumetrik dan mekanik campuran aspal (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

Temperatur pencampuran merupakan salah satu parameter penting dalam produksi campuran aspal panas (*hot-mix asphalt*). Pada temperatur terlalu rendah, viskositas aspal cenderung meningkat sehingga distribusi pengikat pada permukaan agregat kurang optimal dan sulit dipadatkan. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan rongga udara yang dapat memicu masuknya air sehingga mengurangi ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat kelembapan. Sebaliknya, apabila temperatur terlalu tinggi, hal itu dapat mempercepat penuaan jangka pendek akibat oksidasi dan penguapan yang berpengaruh pada kemampuan campuran dalam mengakomodasi regangan. Pengaruh tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara temperatur dan kinerja campuran tidak selalu linier. Peningkatan temperatur tidak serta-merta menghasilkan campuran dengan kualitas yang lebih baik. Temperatur pencampuran dapat berubah mengikuti karakteristik pengikat dan penggunaan bahan tambahan, sehingga penentuan temperatur perlu mempertimbangkan sifat material (Wasiuddin et al., 2007). Selain itu, variasi temperatur 150°C, 160°C, dan 170°C pada campuran *AC-BC* menghasilkan perbedaan karakteristik campuran, di mana temperatur yang lebih tinggi tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik (Yani et al., 2023). Durasi dan temperatur perendaman dapat memengaruhi karakteristik *Marshall* campuran *AC-WC*, termasuk penurunan nilai stabilitas, yang mengindikasikan bahwa paparan air dan temperatur merupakan faktor penting dalam evaluasi kinerja campuran beraspal (Saragi et al., 2017).

Di dalam praktik perkerasan jalan, perlu dibedakan antara temperatur pencampuran, temperatur penghamparan dan temperatur pemadatan. Oleh karena itu, pengendalian temperatur perlu didasarkan pada karakteristik bahan pengikat yang digunakan, kondisi agregat, kebutuhan pelapisan agregat dan persyaratan pemadatan. Pendekatan tersebut diperlukan untuk memperoleh campuran yang homogen, memiliki karakteristik sesuai dengan spesifikasi, dan tidak mengalami penurunan mutu akibat proses pemanasan yang tidak sesuai. Namun demikian, kerusakan jalan sering terjadi sebelum mencapai umur rencana. Faktor penyebabnya antara lain pengaruh air, beban kendaraan berlebih, ketidaksesuaian pelaksanaan konstruksi dengan spesifikasi teknis, serta proses pemadatan yang tidak optimal (Hariyadi & Ricky, 2022). Suhu pencampuran dan pemadatan yang tidak terkontrol dapat menyebabkan rongga dalam campuran tidak tertutup sempurna sehingga air mudah masuk dan menurunkan durabilitas lapisan. Penelitian menunjukkan bahwa variasi suhu produksi berpengaruh signifikan terhadap karakteristik volumetrik dan stabilitas Marshall campuran aspal (Setiadji, 2008). Selain itu, temperatur yang tidak sesuai dapat menurunkan kinerja durabilitas dan ketahanan terhadap deformasi permanen.

Pemilihan jenis aspal merupakan aspek penting dalam desain campuran *AC-BC* karena bahan pengikat mempengaruhi respons viskoelastik campuran terhadap temperatur dan pembebanan. Salah satu pendekatan untuk memilih aspal berdasarkan karakteristik kinerjanya adalah sistem *Performance Grade (PG)*. Dalam sistem tersebut, angka pertama menunjukkan kelas temperatur tinggi yang menjadi dasar evaluasi kemampuan pengikat dalam merespons temperatur perkerasan, sedangkan angka kedua menunjukkan kelas temperatur rendah yang berkaitan dengan risiko retak termal. Dengan demikian, PG 70 menunjukkan kelas kinerja temperatur tinggi 70°C. Penggunaan aspal dengan kelas temperatur tinggi PG 70 dapat dipertimbangkan berdasarkan kondisi iklim, temperatur perkerasan dan ketahanan terhadap deformasi. Peningkatan kelas PG temperatur tinggi dari 70 menjadi 76 pada bahan pengikat yang diteliti berkaitan dengan penurunan deformasi permanen pada pengujian

campuran tertentu (Federal Highway Administration, 2002). Penggunaan PG-70 pada penelitian ini didasarkan pada alasan teknis, yaitu untuk evaluasi perilaku campuran *AC-BC* dengan pengikat yang memiliki kelas kinerja temperatur tinggi tertentu ketika mengalami variasi temperatur pencampuran. Di sisi lain, PG-70 tidak otomatis dianggap lebih baik untuk semua kondisi karena kelas temperatur rendah, sifat reologi, karakteristik agregat, dan kebutuhan pemadatan juga perlu dipertimbangkan. Evaluasi ini dimaksudkan agar temperatur pencampuran yang dipilih tidak hanya memenuhi parameter *Marshall*, tetapi juga sesuai dengan karakteristik pengikat dan kebutuhan kinerja perkerasan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh temperatur terhadap karakteristik campuran aspal, tetapi hasilnya menunjukkan bahwa temperatur optimum dapat berbeda menurut jenis campuran, bahan pengikat, kadar aspal, dan kondisi pemadatan yang diterapkan. Evaluasi pengaruh variasi temperatur pemadatan pada campuran *AC-BC* menunjukkan bahwa pemenuhan parameter *Marshall* bergantung pada temperatur yang digunakan (Raharjo et al., 2016). Penggunaan variasi temperatur pencampuran 150°C, 160°C, dan 170°C serta variasi jumlah tumbukan pada *AC-BC* dilakukan untuk mengetahui respons parameter *Marshall* terhadap perubahan kondisi produksi, walaupun belum berdampak langsung pada kelas kinerja temperatur tinggi PG 70 (Yani et al., 2023). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur pencampuran terhadap karakteristik *Marshall* campuran *AC-BC* dengan aspal PG-70 serta menentukan rentang temperatur yang menghasilkan karakteristik campuran yang memenuhi persyaratan teknis Bina Marga 2018.

METODE

Rancangan penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif yang dilaksanakan di laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pencampuran terhadap karakteristik campuran aspal beton *Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)* menggunakan aspal jenis PG-70. Penelitian eksperimen dipilih karena memungkinkan evaluasi hubungan antara variabel yang diuji, yaitu suhu pencampuran, dan respons campuran beraspal yang dinyatakan melalui parameter *Marshall* serta karakteristik volumetrik.

Suhu pencampuran ditetapkan sebagai variabel bebas dengan variasi 140°C, 150°C, 160°C, 170°C, dan 180°C. Pemilihan variasi tersebut dimaksudkan untuk mengevaluasi respons campuran pada rentang temperatur yang berbeda, mulai dari temperatur relatif rendah hingga tinggi. Rentang temperatur 140–180°C dipilih dengan interval 10°C agar pengaruh perubahan temperatur dapat dibandingkan secara bertahap, termasuk untuk mengidentifikasi kemungkinan perubahan karakteristik campuran akibat perbedaan viskositas aspal, kemampuan pelapisan agregat, dan kemudahan pemadatan. Temperatur yang relatif rendah digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan berkurangnya kemampuan aspal dalam melapisi agregat dan meningkatnya kesulitan pemadatan. Sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi, dimaksudkan untuk mengamati respons campuran terhadap pemanasan yang lebih intensif serta kemungkinan perubahan karakteristik pengikat akibat penuaan jangka pendek. Pemilihan temperatur pencampuran perlu mempertimbangkan jenis dan karakteristik aspal yang digunakan karena berpengaruh terhadap temperatur pencampuran dan kondisi pemadatan (Asphalt Institute, 2016). Dengan demikian, rentang 140–180°C dalam penelitian ini merupakan rentang eksperimental yang digunakan untuk mengevaluasi respons campuran, bukan rentang temperatur yang direkomendasikan untuk seluruh jenis aspal PG-70.

Variabel terikat yang diamati meliputi parameter *Marshall* dan karakteristik volumetrik campuran, yaitu nilai stabilitas, *flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), serta Marshall Quotient (MQ)*. Adapun variabel kontrol pada penelitian ini adalah

gradasi agregat, kadar aspal optimum (KAO), jenis dan mutu aspal yang digunakan (PG-70), metode pencampuran, dan jumlah tumbukan pemadatan agar hasil pengujian tetap konsisten dan dapat dibandingkan secara objektif (Kadarwanto, 2015). Penggunaan parameter *Marshall* dan karakteristik volumetrik sesuai dengan fungsi pengujian *Marshall* untuk evaluasi campuran beraspal padat (ASTM International, 2002).

Pengujian material dan perencanaan campuran

Tahapan penelitian diawali dengan pemeriksaan dan pengujian material penyusun campuran, meliputi agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), dan aspal PG-70. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh material memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, termasuk pengujian berat jenis, penyerapan, keausan agregat, serta sifat fisik aspal (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Setelah material dinyatakan memenuhi syarat, dilakukan perencanaan campuran (*mix design*) menggunakan metode *Marshall* untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) yang akan digunakan pada variasi suhu, yaitu 140°C, 150°C, 160°C, 170°C, dan 180°C. Selanjutnya, dilakukan pembuatan benda uji dengan mencampurkan agregat dan aspal pada suhu yang telah ditentukan sesuai variasi penelitian. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam cetakan dan dipadatkan menggunakan alat pemadat *Marshall* dengan jumlah tumbukan sesuai standar untuk lalu lintas berat, yaitu 75 tumbukan pada setiap sisi benda uji. Setelah proses pemadatan, benda uji didiamkan selama 24 jam sebelum direndam dalam *water bath* pada suhu 60°C selama ±30 menit sebagai persiapan pengujian *Marshall.* Prosedur ini sesuai dengan fungsi metode *Marshall* sebagai dasar perencanaan dan evaluasi campuran beraspal melalui analisis stabilitas, *flow,* kepadatan, serta rongga campuran *(ASTM International, 2002).*

Tahap berikutnya adalah pelaksanaan pengujian Marshall untuk memperoleh nilai stabilitas dan *flow.* Dari hasil pengujian tersebut, kemudian dihitung parameter volumetrik seperti *VIM*, *VMA*, *VFA*, serta *Marshall Quotient*. Data yang diperoleh dianalisis dan dibandingkan dengan persyaratan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk menentukan suhu pencampuran yang memberikan hasil paling optimal. Dengan metode ini, diharapkan dapat diketahui suhu pencampuran yang menghasilkan campuran dengan kepadatan maksimal, rongga udara sesuai standar, stabilitas tinggi, serta durabilitas yang baik sehingga dapat meningkatkan kinerja perkerasan jalan secara keseluruhan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian karakteristik setiap agregat dalam penelitian bertujuan untuk mengetahui karakteristik atau sifat-sifat fisik dari agregat kasar, agregat halus, *filler* maupun aspal. Agregat yang digunakan sebagai penyusun campuran beraspal panas *AC-BC (Asphalt Concrete-Binder Course)* adalah agregat kasar yang meliputi *coarse aggregate* dengan ukuran butir agregat ⅔" (10-20 mm) dan *medium aggregate* dengan butir agregat ½" (5-10 mm), agregat halus berupa abu batu dengan ukuran butir agregat 0-5 mm, bahan pengisi filler abu batu lolos saringan No. 200 dan bahan pengikat atau aspal *shell performance grade* (PG) 70. Agregat kasar dan agregat halus yang digunakan dalam penelitian berasal dari PT. Karya Adi Kencana KSO, Kebumen. Sedangkan bahan pengisi atau *filler* yang digunakan merupakan produksi PT. Kurnia Artha Pratiwi, Padalarang-Bandung dan aspal sebagai perekat produksi dari PT. Kartika Prima Abadi, Semarang. Acuan yang digunakan dalam pengujian karakteristik setiap agregat adalah SNI 8129:2015 untuk agregat dan SNI 8426:2017 untuk bahan perekat aspal (Badan Standardisasi Nasional, 2015); (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Hasil pengujian karakteristik aspal PG 70 ditunjukkan pada Tabel 1.

Pengujian Gradasi Butir Agregat Kasar, Halus dan *Filler*

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan pembagian ukuran butir atau gradasi setiap agregat dengan menggunakan suatu saringan. Adapun acuan dalam pengujian ini menggunakan acuan SNI

03-1968-1990 atau AASHTO T.27-88 dengan masing-masing fraksi agregat menggunakan 4 sampel uji (Standar Nasional Indonesia, 1990; AASHTO, 2000). Hasil dari pengujian ini berupa data agregat tertahan, lolos ayakan dan nilai rata-rata lolos dari kedua sampel uji.

Tabel 1. Hasil Pengujian Karakteristik Aspal PG 70

Jenis Pengujian	Satuan	Spesifikasi*)	Tipe Aspal PG 70	
			Hasil Pemeriksaan	Keterangan
A. Aspal segar (*original binder*)				
Penetrasi pada 25°C	0,1 mm	Dilaporkan	28,50	-
Titik lembek	°C	Dilaporkan	67,80	-
Titik nyala (*COC*)	°C	≥ 230	305,80	Memenuhi
Daktilitas	cm	Dilaporkan	43,83	-
Kelarutan dalam *trichloroethylene*	%	≥ 99	99,16	Memenuhi
Berat jenis bitumen keras	gr/ml	≥ 1.03	1,053	Memenuhi
Stabilitas penyimpanan (perbedaan titik lembek)	°C	≤ 2,2	0,25	Memenuhi
Viskositas kinematis pada suhu 135°C	Cst	≤ 3000	2672,20	Memenuhi
DSR original binder fail temperature	°C	Min. 82	86,20	Memenuhi
B. Residu aspal setelah *RTFOT*				
Kehilangan berat *(RTFOT)*	%	≤ 0,8	-0,030	Memenuhi
Penetrasi pada 25°C setelah *RTFOT*	%	≥ 30	70,88	Memenuhi
Daktilitas setelah *RTFOT*	cm	Dilaporkan	14,00	-
DSR (RTFOT) fail temperature	°C	Min. 82	88,00	Memenuhi
C. Residu aspal *TFOT* atau *RTFOT* seletah *PAV*				
Temperatur yang menghasilkan geser dinamis atau *DSR PAV* @ 5000 kPa *Fail temperature*	°C	Max. 31	28,20	Memenuhi

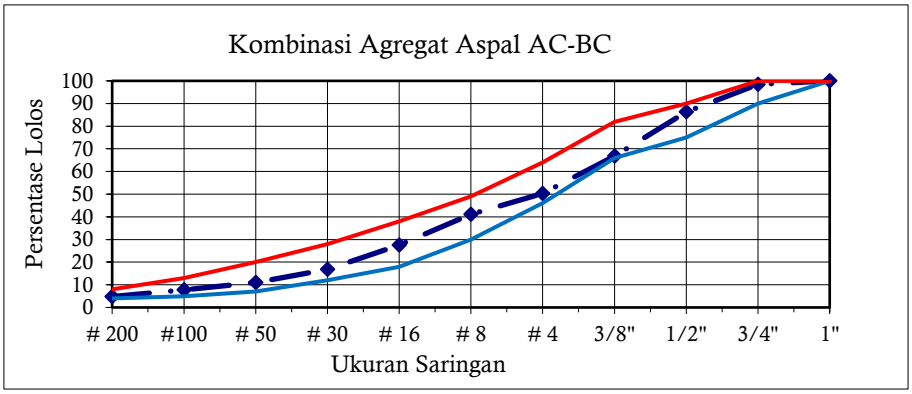
*) Standar Nasional Indonesia 8129:2015 (Badan Standardisasi Nasional, 2015)

Pemeriksaan Kombinasi Gradasi Agregat Penyusun *AC-BC*

Pemeriksaan kombinasi gabungan gradasi agregat ini diperoleh dari pengujian saringan hasil persentase rata-rata lolos setiap fraksi agregat dan dipadukan dengan persentase kebutuhan setiap agregat untuk menyusun campuran beraspal panas laston *AC-BC.* Sesuai dengan rencana pencampuran, kebutuhan agregat (non beraspal) berupa agregat kasar *coarse aggregate (CA*) ukuran ⅔" sebesar 30%, agregat kasar *medium aggregate (MA)* ukuran ½" sebesar 25%, abu batu sebesar 45%. Variasi grafik hasil kombinasi gabungan gradasi agregat penyusun laston *AC-BC* dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat

Pengujian berat jenis agregat dan penyerapan agregat dalam perencanaan campuran beraspal diperlukan karena menimbang perbandingan berat lebih teliti daripada perbandingan volume (Tabel 2 dan Tabel 3). Nilai berat jenis yang kecil mempunyai volume yang besar sehingga membutuhkan lebih banyak bahan perekat atau aspal. Nilai berat jenis juga dipakai untuk mengekspresikan nilai kerapatan (*density*), di mana nilai kerapatan diperoleh dari hasil perkalian antara berat jenis agregat dengan kerapatan air pada suhu tertentu. Acuan dalam pengujian berat jenis dan penyerapan agregat ini adalah SNI 031-1969-1990 (Standar Nasional Indonesia, 1990b).



Gambar 1. Grafik Nilai Kombinasi Agregat

Tabel 2. Hasil Pengujian Berat jenis dan Penyerapan Air setiap Fraksi Agregat

No	Uraian Agregat	Bj. Curah (*Bulk*)	Bj. Semu (*Apparent*)	Penyerapan Air Agregat
		B	C	D
1	*CA*	2.475	2.675	3.102
2	*MA*	2.737	2.836	1.188
3	Abu batu	2.684	2.705	0.281

Tabel 3. Berat Jenis Gabungan Agregat

Uraian Pengujian	Persamaan	Nilai
Berat jenis aspal	-	1,040
Bj. curah (*bulk*) agregat campuran	$Gsb = \frac{100}{\frac{\%\,CA}{B1} + \frac{\%\,MA}{B2} + \frac{\%\,AB}{B3} + \frac{\%\,F}{B4}}$	2,638
Bj. semu (*apparent*) agregat campuran	$Gsa = \frac{100}{\frac{\%\,CA}{C1} + \frac{\%\,MA}{C2} + \frac{\%\,AB}{C3} + \frac{\%\,F}{C4}}$	2,735
Bj. efektif agregat	$Gse = \frac{100 - Kadar\ Aspal}{\frac{100}{GMM\ Pb} - \frac{Kadar\ Aspal}{Bj.Aspal}}$	2,691
Penyerapan aspal terhadap total agregat	$Pba = 100(\frac{Bj.Eff - Bj.Bulk}{Bj.Eff \times Bj.Bulk}) \times 100$	0,782
Aspal terserap oleh agregat	$Aspal\ terserap = Pba \times 0{,}5$	0,391
perkiraan kadar aspal optimum	$Pb = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045(\%FA) + K\ (\%Filler) + F$	6,9
Perkiraan kadar aspal effektif	$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} \times Ps$	6,14

Pemeriksaan Kadar Aspal Perkiraan (Pb) berdasarkan *Asphalt Institute*

Menurut *Asphalt Institute Manual Series* No.2 (MS-2), edisi ke-7 tahun 2014, perkiraan kadar aspal optimum menurut *Asphalt Institute* diperoleh melalui Persamaan 1 (Asphalt Institute, 2014). Hasil perhitungan kadar aspal perkiraan (*Pb*) ditunjukkan pada Tabel 4.

$$Pb = 0{,}035\ (\%\ CA) + 0{,}045\ (\%\ FA) + K\ (\%\ Filler) + F \quad (1)$$

Keterangan :

Pb = Kadar aspal perkiraan

CA = Fraksi agregat tertahan saringan No. 8 (2,36 mm)

FA = Fraksi agregat lolos saringan No. 8 (2,36 mm) dan tertahan di saringan No. 200 (0,075 mm)

Filler = Fraksi agregat lolos saringan No. 200 (0,075 mm)

K = 0,15 untuk 11-15% fraksi agregat lolos saringan No. 200 (0,075 mm)
0,18 untuk 6-10% fraksi agregat lolos saringan No. 200 (0,075 mm)
0,20 untuk ≤ 5% fraksi agregat lolos saringan No. 200 (0,075 mm)

F = Nilai konstanta berkisar antara 0-2% (dalam penelitian ini nilai konstanta menggunakan 2%)

Tabel 4. Hasil Kadar Aspal Perkiraan (Pb)

Bahan Penyusun	Notasi	Nilai
CA	100 – 45,36 (Lolos Saringan No. 8)	54,64
FA	100 – (54,64 (CA) + 4,81 (Lolos Saringan N0. 200)	41,19
Filler	Lolos Saringan No. 200	4,81
K	Lolos Saringan No. 200 = 4,81	0,20
F	-	2
Hasil Pb	0,035 (54,64) + 0,045 (41,19) + 0,20 (4,81) + 2	40,62 %
Kadar Aspal Perkiraan (Pb) Terpakai		5 %

Perancangan Komposisi Agregat dengan Kadar Aspal Perkiraan (Pb) 5%

Perancangan komposisi agregat difungsikan untuk melengkapi kebutuhan agregat penyusun laston *AC-BC* 100 (Tabel 5). Pengurangan dan penambahan agregat dilakukan pada agregat halus (abu batu).

(100 - Persentase Kadar Aspal) × *Persentase Agregat Rancangan÷100* (2)

Tabel 5. Kebutuhan setiap Agregat

Agregat	Agregat Rancangan (%)	Aspal (%)	Kebutuhan Agregat (%)	gram
CA	30		30	360
MA	25	5,00	25	300
Abu batu	45		45	540
Total			95	1200

Pengujian Berat Jenis Campuran Maksimum Teoritis (*Gmm*)

Acuan dalam pengujian ini yaitu AASHTO T.209-90 (AASHTO, 2025). Berat jenis campuran maksimum merupakan berat jenis benda uji campuran beraspal sebelum dipadatkan yang bertujuan untuk mengetahui berat jenis campuran tanpa pori atau rongga udara. Pengujian dilakukan pada masing-masing variasi campuran dengan kadar aspal perkiraan (*Pb*). Adapun hasil pengujian *Gmm* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian *Gmm* Variasi Kadar Aspal 5%

No	Uraian Pemeriksaan	Notasi	Satuan	Sampel Uji				
				Suhu 140 °C	Suhu 150 °C	Suhu 160 °C	Suhu 170 °C	Suhu 180 °C
1	Berat sampel	-	gram	2560.9	2572.4	2584.7	2591.3	2601.5
2	Berat botol + air	-	gram	4316.4	4316.4	4316.4	4316.4	4316.4
3	Berat botol + air + sampel	-	gram	5215.6	5207.6	5205.7	5198.9	5221.4
4	Berat jenis	1/(1+2-3)	gram/cc	2.494	2.434	2.399	2.360	2.422

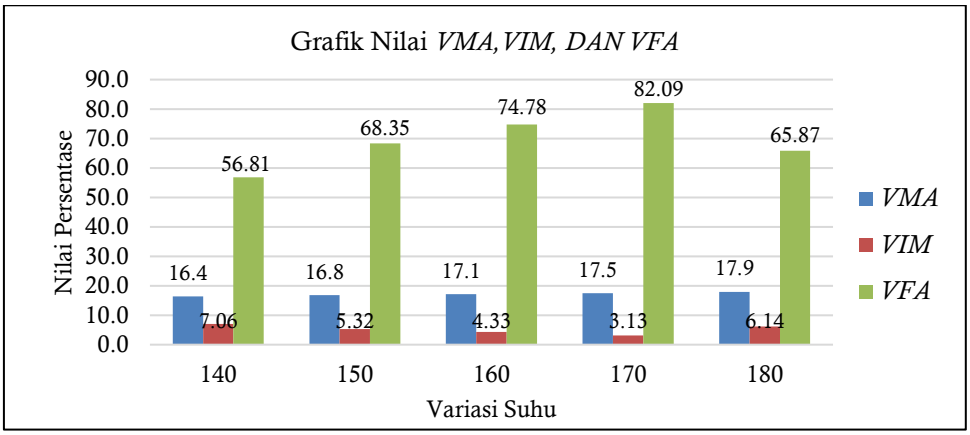
No	Uraian Pemeriksaan	Notasi	Satuan	Sampel Uji				
				Suhu 140 °C	Suhu 150 °C	Suhu 160 °C	Suhu 170 °C	Suhu 180 °C
5	Suhu air	-	°C	28	28	28	28	28
6	Koreksi suhu*)	Tabel 4.24	-	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992
7	Berat jenis terkoreksi	4 × 6	gram/cc	2.492	2.432	2.397	2.358	2.420

Tabel 7. Nilai Koreksi Suhu Air dengan Temperatur Tertentu

Temperatur °C	23	24	25	26	27	28
Koreksi Suhu	1,0005	1,0003	1,0000	0,9997	0,9995	0,9992

Temperatur °C	29	30	31	32	33	34
Koreksi Suhu	0,9989	0,9986	0,9983	0,9980	0,9977	0,9974

Hasil Nilai *VMA*, *VIM*, *VFA* Pencampuran Aspal Suhu 140℃, 150℃, 160℃, 170℃ dan 180℃



Gambar 2. Diagram Persentase Nilai *VMA*, *VIM*, *VFA*

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Suhu 140℃, 150℃, 160℃, 170℃ dan 180℃

No	Item Pengujian	Variasi Suhu					Keterangan	Kesimpulan
		140 ℃	150 ℃	160 ℃	170 ℃	180 ℃		
1	Karakteristik agregat		✓	✓	✓	✓	Semua kriteria memenuhi persyaratan	Bahan material bisa digunakan untuk campuran
2	Analisis saringan dan kombinasi gradasi	✓	✓	✓	✓	✓	Variasi variasi suhu 140℃, 150℃, 160℃, 170℃ dan 180℃ memenuhi persyaratan	Variasi variasi suhu 140℃, 150℃, 160℃, 170℃ dan 180℃ dapat digunakan sebagai bahan campuran laston *AC-BC*
3	Berat jenis dan penyerapan air agregat	✓	✓	✓	✓	✓	Semua agregat bahan penyusun campuran beraspal telah dilakukan pengujian	Semua variasi suhu dapat digunakan sebagai bahan campuran laston *AC-BC*
4	Pengujian berat jenis campuran maksimum teoritis (*Gmm*)	✓	✓	✓	✓	✓	Semua campuran beraspal dengan variasi suhu telah dilakukan pengujian	Semua variasi suhu dapat digunakan sebagai bahan campuran laston *AC-BC*

Pengujian Sifat-sifat Campuran Beraspal dengan Metode *Marshall*

Pengujian ini mengacu pada RSNI M-01-2003 tentang Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat *Marshall* dan Spesifikasi Umum Direktorat Jenderal Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2) (Standar Nasional Indonesia, 2003; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).

Tabel 9. Hasil Pengujian Sifat-sifat Campuran Aspal dengan Metode *Marshall*

Benda Uji	Kadar Aspal (%)	Data Timbang (gr)			Volume atau Isi	BJ. Bulk Campuran	BJ. Maks Kombinasi Campuran Agregat (*Gmm*)	Rongga diantara Aggregat (*VMA*) %	Rongga dalam Campuran (*VIM*) %	Rongga Terisi Aspal (*VFA*) %	Stabilitas		Kelelehan Plastis Flow (mm)	Hasil Bagi *Marshall* MQ**) (kg/mm)	Kadar Aspal Efektif (%)
		Berat di Udara	Berat dalam Air	Berat SSD							Arloji (strip)	*Convert**) (kg)			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	P
-	-	-	-	-	D – C	B / E		100-(100-A)×F/BJ. *Bulk Agg*	100-(100×H)/G	100× (H-I)/H	-	K × 15,94	-	L / M	A-((O/100)×(100-A)
Suhu 140 °C	5.00	1191.6	682.1	1197.1	515.0	2.314	2.492	16.42	7.14	56.52	150	2391	3.10	771.3	4,21
	5.00	1085.6	621.8	1090.2	468.4	2.318	2.492	16.28	6.98	57.11	145	2311	3.15	733.7	
				Rata-rata =	491.7	2.316	2.492	16.35	7.06	56.81	148	2351	3.13	752.5	
Suhu 150 °C	5.00	1095.8	620.9	1097.2	476.3	2.301	2.432	16.90	5.42	67.93	147	2343	3.30	710.1	5,18
	5.00	1090.7	621.1	1094.2	473.1	2.305	2.432	16.72	5.22	68.77	150	2391	3.20	747.2	
				Rata-rata =	474.7	2.303	2.432	16.81	5.32	68.35	149	2367	3.25	728.6	
Suhu 160 °C	5.00	1156.5	657.2	1161.3	504.1	2.294	2.397	17.13	4.31	74.86	148	2359	3.50	674.0	5,77
	5.00	1150.8	652.7	1154.5	501.8	2.293	2.397	17.16	4.34	74.70	152	2423	3.25	745.5	
				Rata-rata =	503.0	2.294	2.397	17.15	4.32	74.78	150	2391	3.38	709.8	
Suhu 170 °C	5.00	1088.3	616.7	1092.9	476.2	2.285	2.358	17.45	3.08	82.33	149	2375	3.45	688.4	6,46
	5.00	1090.4	618.8	1096.4	477.6	2.283	2.358	17.53	3.18	81.85	153	2439	3.40	717.3	
				Rata-rata =	476.9	2.284	2.358	17.49	3.13	82.09	151	2407	3.43	702.9	
Suhu 180 °C	5.00	1092.6	620.9	1101.7	480.8	2.272	2.420	17.91	6.08	66.04	150	2391	3.59	666.0	5,39
	5.00	1105.4	623.9	1110.7	486.8	2.271	2.420	17.98	6.17	65.69	155	2471	3.56	694.0	
				Rata-rata =	483.8	2.272	2.420	17.95	6.13	65.87	153	2431	3.58	680.0	

Pengaruh Suhu terhadap Campuran Aspal dengan Variasi Suhu 140℃, 150℃, 160℃, 170℃ dan 180℃

Pada suhu pencampuran 140℃, nilai *VIM* 7,06%, *VMA* 16,4%, dan *VFA* 56,81% tidak memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, sehingga tidak layak digunakan karena berpotensi mengalami *bleeding*, retak dini, dan pengelupasan. Pada suhu 150℃, nilai *VIM* 5,32% dan *VMA* 16,8% belum memenuhi spesifikasi, meskipun *VFA* 68,35% sudah sesuai. Campuran ini juga belum layak digunakan dan berisiko mengalami retak serta pengelupasan. Pada suhu 160℃, nilai *VIM* 4,33% dan *VFA* 74,78% memenuhi spesifikasi, sedangkan *VMA* 17,1% berada pada batas minimal. Campuran pada suhu ini dinyatakan layak digunakan. Pada suhu 170℃, nilai *VIM* 3,13%, *VMA* 17,5%, dan *VFA* 82,09% memenuhi spesifikasi, sehingga suhu ini dinyatakan layak dan menjadi suhu pencampuran terbaik. Pada suhu 180℃, nilai *VIM* 6,14% tidak memenuhi spesifikasi meskipun *VMA* 17,9% dan *VFA* 65,87% sudah sesuai. Oleh karena itu, suhu ini tidak layak digunakan karena berpotensi menyebabkan *bleeding*.

Secara umum, suhu pencampuran sangat memengaruhi karakteristik campuran aspal. Hal ini terlihat dari nilai *VIM*, *VMA*, dan *VFA*. *VIM* terlalu rendah membuat campuran rapuh dan getas, sedangkan *VIM* terlalu tinggi menyebabkan bleeding. Nilai *VMA* yang rendah mengurangi ketebalan selimut aspal pada agregat sehingga meningkatkan risiko retak dini.

Hasil Pengujian Stabilitas *Marshall* 24 jam

Setelah variasi kadar *filler* terbaik didapat, untuk mengetahui nilai stabilitas *Marshall* sisa perlu dilakukan pengujian *Marshall* kembali dengan perendaman benda uji *Marshall* pada *water bath* selama 24 jam. Adapun hasil pengujian *Marshall* perendaman 24 jam ditampilkan pada Tabel 10.

Berdasarkan grafik yang tertera pada Tabel 10, suhu dalam pencampuran aspal sangat berpengaruh terhadap kualitas aspal itu sendiri. Dari beberapa uji *Marshall* yang telah dilakukan pada suhu campuran 160℃ dan 170℃, yang mampu memenuhi persyaratan spesifikasi umum Bina Marga Tahun 2018. Sehingga dapat disimpulkan bahwa suhu pencampuran terbaik berada pada rentang suhu 160°C dan 170°C. Pada suhu 140℃, persyaratan yang berlaku tidak bisa terpenuhi. Pada suhu 150℃, nilai *VIM* sebesar 5,32% tidak dapat terpenuhi, di mana angka tersebut melampaui batas maksimal dari spesifikasi *VIM* itu sendiri. Begitu pula dengan pencampuran aspal pada suhu 180 °C. Nilai *VIM* melampaui spesifikasi yang ada, yaitu pada angka persentase 3% sampai dengan 5%. Peningkatan nilai *VIM* pada suhu pencampuran 180°C diduga disebabkan oleh penuaan jangka pendek aspal akibat pemanasan berlebih yang dapat meningkatkan kekakuan aspal dan mengurangi efektivitas pemadatan. Selain itu, kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh homogenitas campuran dan proses pemadatan, sehingga temperatur yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan karakteristik volumetrik yang lebih baik.

Tabel 10. Hasil Pengujian Sifat-sifat Campuran Aspal dengan Metode *Marshall* setelah Perendaman 24 jam

Benda Uji	Kadar Aspal (%)	Data Timbang (gr)			Volume atau Isi	BJ. Bulk Campuran	BJ. Maks Kombinasi Campuran Agregat (*Gmm*)	Rongga diantara Aggregat (*VMA*) %	Rongga dalam Campuran (*VIM*) %	Rongga Terisi Aspal (*VFA*) %	Stabilitas		Kelelehan Plastis Flow (mm)	Hasil Bagi *Marshall* MQ**) (kg/mm)	Kadar Aspal Efektif (%)
		Berat di Udara	Berat dalam Air	Berat SSD							Arloji (strip)	*Convert**) (kg)			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	P
-	-	-	-	-	D – C	B / E		100-(100-A)×F/BJ. Bulk Agg	100-(100×H)/G	100× (H-I)/H	-	K × 15,94	-	L / M	A-((O/100)×(100-A)
24 jam	5%	1199.5	685.4	1204.6	519.2	2.310	2.398	16.55	3.66	77.85	75	1196	3.40	351.6	5,76
	5%	1198.1	684.1	1200.8	516.7	2.319	2.398	16.24	3.31	79.61	74	1180	3.50	337.0	
				Rata-rata =	517.95	2.314	2.398	16.35	3.45	78.73	74.5	1188	3.45	344.3	
30 menit	5%	1199.1	678.2	1200.1	521.9	2.298	2.398	17.01	4.20	75.33	72	1148	3.80	302.0	5,76
	5%	1199.6	678.6	1200.3	521.7	2.299	2.398	16.94	4.12	75.69	74	1180	4.00	294.9	
				Rata-rata =	521.8	2.298	2.398	16.97	4.16	75.51	73	1164	3.90	298.45	
Nilai stabilitas *Marshall* sisa (stabilitas 24 jam ÷ stabilitas 30 menit) × 100							(1158		196) × 100 = 96,89% > 90% (memenuhi)						

- Nilai berat jenis maksimal kombinasi campuran agregat (*Gmm*) variasi campuran pada suhu 140℃ sebesar 2.492 gr/cc, pada suhu 150℃ sebesar 2,432 gr/cc pada suhu 160℃ sebesar 2,397 gr/cc pada suhu 170℃ sebesar 2,358 gr/cc dan suhu 180℃ sebesar 2,420 gr/cc
- Nilai *VIM* (*void in the mix* atau rongga udara di dalam campuran) variasi campuran pada suhu 140℃ sebesar 7,062%, suhu 150℃ sebesar 5,321%, suhu 160℃ sebesar 4,325%, suhu 170℃ sebesar 3,133% dan suhu 180℃ sebesar 6,126%.
- Nilai *VMA* (*void in the mineral aggregate* atau rongga di dalam agregat) variasi campuran pada suhu 140℃ sebesar 16,352 %, suhu 150℃ sebesar 16,810%, suhu 160℃ sebesar 17,145%, suhu 170℃ sebesar 17,490% dan suhu 180℃ sebesar 17,946 %.
- Nilai *VFA* (*void in filled with asphalt* atau persentase rongga yang terisi aspal) variasi campuran pada suhu 140℃ sebesar 56,814%, pada suhu 150℃ sebesar 68,351%, pada suhu 160℃ sebesar 74,776 %, pada suhu 170℃ sebesar 82,089% dan suhu 180℃ sebesar 65,866 %.
- Nilai stabilitas atau kemampuan perkerasan dalam menerima beban sampai terjadi kelelehan variasi campuran pada suhu 140℃ 148 strip 2351 kg , pada suhu 150℃ 149 strip 2367 kg pada suhu 160℃ 150 strip 2391 kg, pada suhu 170℃ 151 strip 2407 kg dan suhu 180℃ 153 strip 2431 kg.
- Nilai *Marshall Quotient* variasi campuran pada suhu 140℃ sebesar 680,017 kg/mm, pada suhu 150℃ sebesar 702,862 kg/mm pada suhu 160℃ sebesar 709,768 kg/mm, pada suhu 170℃ sebesar 728,621 kg/mm dan suhu 180℃ sebesar 752,518 kg/mm.
- Nilai kelelehan plastis atau variasi *flow* campuran pada suhu 140℃ sebesar 3,125 mm, pada suhu 150℃ sebesar 3,250 mm pada suhu 160℃ sebesar 3,375 mm, pada suhu 170℃ sebesar 3,425 mm dan suhu 180℃ sebesar 3,575 mm.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, suhu pencampuran aspal sangat berpengaruh terhadap karakteristik campuran aspal berdasarkan metode uji *Marshall.* Secara umum, peningkatan suhu pencampuran cenderung meningkatkan kepadatan campuran, tetapi suhu yang tidak tepat dapat memengaruhi nilai *VIM, VMA*, dan *VFA.* Pada suhu pencampuran yang terlalu rendah, pemadatan yang kurang optimal dapat menyebabkan nilai *VIM* terlalu tinggi, sedangkan nilai *VMA* dan *VFA* dipengaruhi oleh hubungan antara rongga agregat, rongga udara, dan volume aspal efektif. Sebaliknya, pada suhu pencampuran yang terlalu tinggi, nilai *VIM* juga dapat meningkat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu pencampuran aspal PG-70 yang memenuhi persyaratan adalah 160°C dan 170°C, dengan suhu optimum berdasarkan karakteristik *Marshall* dan volumetrik pada 170°C, yang menghasilkan nilai *VIM* sebesar 3,133%, *VMA* sebesar 17,490%, dan *VFA* sebesar 82,029%.

DAFTAR PUSTAKA

AASHTO. (2025). *AASHTO T 209, Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Asphalt Mixtures* (Vol. 209).

AASHTO. (2000). AASHTO Designation: T 88-13, Particle size analysis of soils. In *Encyclopedia of volcanoes.* (Vol. 3).

Abu Abdo, A. M., & Jung, S. J. (2016). Effects of Asphalt Mix Design Properties on Pavement Performance: A Mechanistic Approach. *Advances in Civil Engineering*, *2016*(9354058), 1–7. https://doi.org/10.1155/2016/9354058

Asphalt Institute. (2014). Asphalt Mix Design Methods, MS-2, 7th Edition. In *ASTM International*.

Asphalt Institute. (2016). *Determining Laboratory Mixing and Compaction Temperatures* (Number December). https://www.asphaltinstitute.org/technical-resources/determining-laboratory-mixing-and-compaction-temperatures/

ASTM International. (2002). *Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures (ASTM D6927-22).* https://doi.org/https://doi.org/10.1520/D6927-22

Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 8129:2015, Spesifikasi stone matrix asphalt (SMA).*

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8426:2017, Spesifikasi aspal setara kelas kinerja*. www.bsn.go.id

Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)* (Nomor Revisi 2).

Federal Highway Administration. (2002). *Understanding the performance of modified asphalt binders in mixtures: High-temperature characterization (Publication No. FHWA-RD-02-075)* (Number October). https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/56386

Federal Highway Administration. (2012). *Performance testing for Superpave and structural validation (Publication No. FHWA-HRT-11-045)* (November). https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11045/

Hariyadi, E. S., & Ricky, R. (2022). Evaluasi Pengaruh Sudut Putaran pada Pemadatan Campuran Beraspal Menggunakan Superpave Gyratory Compactor (SGC) Terhadap Kinerja Fatigue dan Resilient Modulus pada Stone Matrix Asphalt (SMA). *Jurnal Teknik Sipil*, *29*(2), 171–180. https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.2.8

Intari, D. E., Fathonah, W., & Kirana, F. W. (2018). Analisis Karakteristik Campuran Lataston (Hrs-Wc) Akibat Rendaman Air Laut Pasang (Rob) Dengan Aspal Modifikasi Polimer Starbit E-55. *Jurnal Fondasi*, *7*(2). https://doi.org/10.36055/jft.v7i2.4075

Kadarwanto, H. H. (2015). *Pengaruh variasi temperatur pada proses pemadatan terhadap campuran aspal beton* [Tugas Akhir]. Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi umum 2018 (Revisi 2): untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan*. https://binamarga.pu.go.id/uploads/files/987/spesifikasi-umum-bina-marga-2018-untuk-pekerjaan-konstruksi-jalan-dan-jembatan-revisi-2.pdf

Poerwodihardjo, F. E., Istiningsih, D., & Nada, A. Q. (2023). Pengaruh Variasi Temperatur Pemadatan Pada Campuran Lapis Aspal Beton Ac-Wc Menggunakan Uji Marshall. *Teodolita: Media Komunkasi Ilmiah Di Bidang Teknik*, *24*(1), 74–83. https://doi.org/10.53810/jt.v24i1.478

Raharjo, B., Pratomo, P., & Ali, H. (2016). Pengaruh Suhu Pemadatan Campuran Untuk Perkerasan Lapis Antara (AC-BC). *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, *4*(1), 43–50. https://doi.org/10.23960/jrsdd.v4i1.345

Saragi, Y. R. R., Lumbangaol, P., Sidabutar, R. A., & Siahaan, B. S. (2017). Marshall Characteristics in Asphalt Concrete -Wearing Corse (AC-WC) in Various Length and Temperature Submersion. *Procedia Engineering*, *171*, 1421–1428. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.460

Setiadji, B. H. (2008). *The influence of environmental factors and curing period toward the performance and durability of asphalt mixtures*. *16*(2), 105–116.

Standar Nasional Indonesia. (1990a). SNI 03-1968-1990, Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar. In *SNI 03-1968-1990*.

Standar Nasional Indonesia. (1990b). *SNI 03-1969-1990, Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*.

Standar Nasional Indonesia. (2003). *RSNI M- 01-2003, Metode pengujian campuran beraspal panas dengan alat Marshall*.

Tahir, A., & Setiawan, A. (2009). Kinerja Durabilitas Campuran Beton Aspal Ditinjau Dari Faktor Variasi Suhu Pemadatan Dan Lama Perendaman. *Jurnal SMARTek*, *7*(1), 45–61.

Wasiuddin, N. M., Selvamohan, S., Zaman, M. M., & Guegan, M. L. T. A. (2007). Comparative Laboratory Study of Sasobit and Aspha-Min Additives in Warm-Mix Asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1998*(1), 82–88. https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1998-10

Yani, L., Rahmaniah, R., & Asriani, A. (2023). Analisis variasi suhu 150°C, 160°C, 170°C dalam variasi jumlah tumbukan terhadap spesifikasi Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC). *Teknosains: Media Informasi Sains Dan Teknologi*, *17*(2), 220–225. https://doi.org/10.24252/teknosains.v17i2.36658