



Pengaruh Variasi Ukuran Agregat dan Suhu Pencampuran terhadap Karakteristik Marshall Campuran *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC)

Zira Artika^{1*}, Yenni Darvina², Leni Aziyus Fitri³, Fadhila Ulfa Jhora⁴

¹⁻⁴Department of Physics, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: ziraartika983@email.com

Abstract. *The performance of asphalt mixtures is strongly influenced by the composition of their constituent materials, particularly aggregate size and mixing temperature during production. In many tropical and subtropical regions, asphalt pavements frequently experience rutting, reduced stability, and changes in viscoelastic properties due to high environmental temperatures and heavy traffic loads. These conditions can significantly affect pavement durability, making it essential to produce asphalt mixtures that meet established technical standards. This study aims to analyze the effect of variations in aggregate size distribution and mixing temperature on the Marshall characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) mixtures. The research employs the Marshall test method to evaluate the load-bearing capacity and stability of hot asphalt mixtures and to assess their compliance with ASTM/SNI standards. The results indicate that mixtures with standard aggregate gradation achieve stability values of 985 kg at 120°C, 1055 kg at 140°C, and 1107 kg at 160°C. As mixing temperature increases, flow values decrease, while the Marshall Quotient (MQ) increases, indicating improved stiffness. Higher temperatures also enhance compaction, reducing VIM and VMA while increasing VFA. Conversely, non-standard aggregate gradations result in several parameters failing to meet ASTM/SNI requirements, confirming that standard gradation produces superior asphalt performance.*

Keywords: AC-WC; Agregat; Marshall Test; Mixing Temperature; Stability.

Abstrak. Kinerja campuran aspal sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusunnya, khususnya ukuran agregat dan suhu pencampuran selama produksi. Di banyak wilayah tropis dan subtropis, perkerasan aspal sering mengalami kerusakan alur, penurunan stabilitas, dan perubahan sifat viskoelastik akibat suhu lingkungan yang tinggi dan beban lalu lintas yang berat. Kondisi ini dapat secara signifikan memengaruhi daya tahan perkerasan, sehingga penting untuk menghasilkan campuran aspal yang memenuhi standar teknis yang telah ditetapkan. Studi ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi distribusi ukuran agregat dan suhu pencampuran terhadap karakteristik Marshall dari campuran Aspal Beton Lapisan Aus (AC-WC). Penelitian ini menggunakan metode uji Marshall untuk mengevaluasi kapasitas daya dukung dan stabilitas campuran aspal panas serta untuk menilai kepatuhannya terhadap standar ASTM/SNI. Hasil menunjukkan bahwa campuran dengan gradasi agregat standar mencapai nilai stabilitas 985 kg pada 120°C, 1055 kg pada 140°C, dan 1107 kg pada 160°C. Seiring peningkatan suhu pencampuran, nilai aliran menurun, sementara Kuosien Marshall (MQ) meningkat, menunjukkan peningkatan kekakuan. Suhu yang lebih tinggi juga meningkatkan pemadatan, mengurangi VIM dan VMA sekaligus meningkatkan VFA. Sebaliknya, gradasi agregat non-standar mengakibatkan beberapa parameter gagal memenuhi persyaratan ASTM/SNI, yang menegaskan bahwa gradasi standar menghasilkan kinerja aspal yang lebih unggul.

Kata kunci: AC-WC; Agregat; Marshall Test; Stabilitas; Suhu Pencampuran.

1. LATAR BELAKANG

Kekerasan jalan adalah komponen Jaringan transportasi yang berperan penting dalam mendukung mobilitas dan aktivitas ekonomi masyarakat. Salah satu jenis lapisan permukaan yang banyak digunakan pada kekerasan lentur adalah menggunakan Lapisan Permukaan (AC-WC). Lapisan ini merupakan lapisan paling atas yang secara langsung menerima beban arus serta pengaruh lingkungan seperti temperatur, air, dan oksidasi. Oleh karena itu, lapisan AC-WC harus memiliki stabilitas yang tinggi, ketahanan terhadap

deformasi, serta kemampuan mendistribusikan tegangan yang dihasilkan oleh beban kendaraan secara efektif sehingga dapat menjaga kinerja struktural perkerasan jalan (Yao et al., 2019).

Secara mekanika material, campuran beraspal panas merupakan sistem komposit yang terdiri dari agregat mineral sebagai kerangka struktur utama dan aspal sebagai bahan pengikat yang bersifat viskoelastis. Dalam sistem ini, agregat berperan sebagai elemen struktural yang menahan sebagian besar beban mekanik melalui mekanisme interlocking antar partikel, sedangkan aspal berfungsi sebagai matriks yang mengikat agregat sekaligus mentransfer tegangan antar partikel agregat. Interaksi antara kedua komponen tersebut sangat menentukan karakteristik mekanik campuran aspal, seperti stabilitas, kekakuan, dan ketahanan terhadap deformasi permanen (Naufal Gilang Pratama et al., 2023)

Pada kondisi pelayanan jalan, lapisan kekerasan menerima beban lalu lintas berulang yang menghasilkan tegangan tekan dan geser pada struktur campuran aspal. Jika tegangan tersebut melebihi kemampuan material untuk mempertahankan bentuknya, maka akan terjadi deformasi permanen pada lapisan kekerasan. Salah satu bentuk deformasi permanen yang paling umum terjadi pada kekerasan lentur adalah rutting, yaitu terbentuknya alur pada jalur roda kendaraan akibat akumulasi deformasi plastis pada campuran aspal (Mehrara & Khodaii, 2013). Fenomena ini umumnya dipengaruhi oleh sifat viskoelastis aspal, kekuatan rangka agregat, serta kondisi temperatur lingkungan yang tinggi.

2. KAJIAN TEORITIS

Temperatur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat reologi aspal. Secara fisika, peningkatan temperatur akan menurunkan viskositas aspal sehingga material menjadi lebih lunak dan mudah mengalami deformasi. Sebaliknya, pada temperatur yang lebih rendah, aspal cenderung menjadi lebih kaku sehingga meningkatkan ketahanan terhadap deformasi namun berpotensi meningkatkan kerentanan terhadap retak. Oleh karena itu, keseimbangan antara viskositas aspal dan kekuatan struktur agregat menjadi faktor penting dalam menentukan kinerja campuran aspal terhadap beban lalu lintas (Naufal Gilang Pratama & Kusuma Refa Haratama, 2023).

Selain sifat material aspal, distribusi ukuran agregat juga berperan penting dalam menentukan performa mekanik campuran. Gradasi agregat yang baik dapat membentuk struktur rangka agregat yang saling mengunci (aggregate interlocking) sehingga mampu menahan gaya geser yang terjadi akibat beban kendaraan. Struktur rangka agregat yang stabil akan meningkatkan kemampuan campuran dalam mendistribusikan tegangan serta mengurangi potensi deformasi permanen pada lapisan kekerasan (Gloria F. Berutu, Judi K. Nasjono, 2023).

Salah satu metode umum yang sering dipakai mengevaluasi karakteristik mekanik campuran aspal adalah uji Marshall. Pengujian ini memberikan parameter penting seperti stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ) yang menggambarkan keseimbangan antara kekuatan struktural dan kemampuan deformasi campuran aspal. Parameter tersebut digunakan secara luas dalam perancangan campuran aspal untuk memastikan bahwa campuran yang dihasilkan memiliki stabilitas yang memadai serta ketahanan terhadap deformasi permanen (Sulaiman et al., n.d.)

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa karakteristik mekanik campuran aspal sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti gradasi agregat (Dotulung et al., 2023), kadar aspal, serta suhu pencampuran (Hamedi et al., 2025) serta variasi ukuran agregat (Ahmad jihad et al., 2024). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih mengkaji faktor-faktor tersebut secara terpisah. Padahal, dalam proses produksi campuran beraspal panas, interaksi antara ukuran agregat dan suhu pencampuran memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses pelapisan aspal pada agregat, pembentukan struktur rangka agregat, serta sifat mekanik campuran secara keseluruhan. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengkaji kombinasi pengaruh variasi ukuran agregat dan suhu pencampuran terhadap karakteristik Marshall Pada kombinasi AC-WC dengan merujuk pada pedoman Bina Marga 2018 masih relatif terbatas. Padahal, spesifikasi tersebut merupakan standar utama yang digunakan dalam perencanaan dan konstruksi perkerasan jalan di Indonesia. Oleh karena itu muncul permasalahan yaitu bagaimana pengaruh variasi ukuran agregat batu pecah dan perubahan suhu campuran aspal panas penetrasi 60/70 terhadap sifat mekanik dengan menggunakan uji marshall dan Ukuran agregat batu pecah dan perubahan suhu manakah yang menghasilkan nilai stabilitas Marshall terbaik pada campuran aspal panas menggunakan aspal penetrasi 60/70?

Sejalan dengan konteks tersebut, studi ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak dari variasi ukuran agregat dan suhu pencampuran terhadap sifat-sifat pada campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) (Direktorat Jenderal Bina Marga., 2020). Selain itu, studi ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kombinasi campuran yang mampu memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 sehingga dapat memberikan rekomendasi komposisi campuran yang optimal dalam meningkatkan kinerja perkerasan jalan.

3. METODE PENELITIAN

Studi ini termasuk dalam kategori studi teknik. Tujuan utamanya adalah untuk menguji dan membandingkan variasi ukuran agregat dan suhu campuran aspal panas, yang bertujuan untuk menguji kekuatan tekan dan seberapa kuat aspal menahan beban ketika di beban dan

deformasi permanen (rutting). Dalam penelitian ini, metode konstruksi digunakan, dengan fokus pada alat dan komponen yang digunakan yaitu Marshall Test. Penelitian dilakukan dengan membuat sampel aspal campuran panas menggunakan ukuran agregat batu pecah yang berbeda dan variasi pencampuran suhu pada aspal panas, kemudian diuji menggunakan metode Uji Marshall sesuai SNI 06-2489-1991 (Muhammad Riski et al., 2021).

Bahan Penelitian

Bahan-bahan dasar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- a. Aspal Penetration 60/70 yang di ambil langsung dari bitumen pertamina (Naufal Gilang Pratama & Kusuma Refa Haratama, 2023)
Berperan sebagai bahan pengikat, sesuai dengan spesifikasi SNI 06-2456-1991 dan Bina Marga 2018 Revisi 2. Sifat fisiknya mencakup penetrasi 60–70 (dalam 0,1 mm), titik lembek 48–56 °C, serta berat jenis sekitar 1,02 g/cm³.
- b. Agregat kasar, yaitu agregat batu pecah ukuran 1-2 cm dan 0,5-1 cm yang berasal dari Teluk kabung
- c. Filler, yaitu abu batu yang berasal dari Teluk Kabung

Jumlah Sampel

Pada pengujian Marshall mendapatkan hasil menggunakan 3 variasi suhu yaitu 120 °C, 140 °C dan 160°C, dengan menggunakan 3 variasi distribusi ukuran yaitu dengan variasi gradasi, tanpa ukuran medium dan tanpa ukuran 1-2 cm. Dimana setiap variasi tersebut menggunakan 3 sampel pengujian, dengan total jumlah sampel yaitu 27 sampel.

Variabel Penelitian

- a. Variabel Bebas: Suhu pencampuran aspal panas, dengan variasi: 120°C, 140°C, dan 160°C dengan Komposisi agregat kasar pada campuran aspal
- b. Variabel Terikat: Parameter sifat mekanik & termal campura (Stabilitas, Flow, MQ, VIM, VMA, VFA,) berdasarkan hasil uji Marshall.
- c. Variabel Kontrol: Jenis aspal (Pen 60/70), kadar aspal & komposisi campuran, gradasi agregat, suhu pencampuran & pemadatan.

Pengujian Marshall

Setiap variasi diuji pada suhu pencampuran yang berbeda untuk mengamati pengaruh suhu terhadap sifat mekanis aspal campuran panas dengan aspal penetrasi 60/7. Proses pencampuran dilakukan menggunakan mixer laboratorium, kemudian campuran dipadatkan untuk membentuk spesimen silinder Marshall sesuai standar SNI 06-2489-1991.



Gambar 1. Alat uji marshall dan ilustrasi.

Pembuatan sampel

- a. Mengeringkan agregat selama 24 jam dalam oven pada suhu 105°C hingga 110°C, kemudian dikeluarkan dan diamkan hingga beratnya stabil, kemudian siapkan agregat.
- b. Meimbang wajan yang sudah steril dan kering dan catat beratnya (A)
- c. Menuangkan campuran agregat ke dalam wajan yang sudah dipanaskan, lalu aduk secara perlahan sampai suhu $\pm 160^{\circ}\text{C}$.
- d. Memanaskan aspal dengan suhu sesuai variasi lalu timbang campuran agregat bersama dengan wajan (B).
- e. Menghitung berat aspal yang sesuai dengan kadar aspal sesuai dengan takarannya.
 Berat aspal dalam benda uji: $\frac{\text{Kadar Aspal}}{100 - \text{Kadar Aspal}} \times (B - A)$
- f. Memasukkan aspal panas ke dalam campuran agregat dan aduk dengan baik pada temperatur 120°C, 140 °C dan 160 °C. Proses pengadukan harus dilakukan secara homogen untuk memperoleh hasil optimal dengan pencampuran suhu masing-masing yang sudah di tetapkan.
- g. Menuangkan campuran agregat dan aspal ke dalam cetakan yang telah dipanaskan sebelumnya, susun cetakan dan lapisan kertas kering di bagian dasar.
- h. Menusuk permukaan sampel dengan spatula sebanyak lima belas kali di sisi tepi dan sepuluh kali di sisi tengah. Kemudian, permukaan atasnya ditutup dengan kertas saring.
- i. memadatkan benda uji dengan cara memberikan 75 kali tumbukan pada setiap permukaan (atas dan bawah). Setelah itu, lepaskan cetakan beserta alat pemadatnya, kemudian diamkan selama ± 1 menit dengan menutupinya menggunakan kain basah. Beri penanda kadar aspal pada benda uji.
- j. Menguji benda uji pada suhu ruangan selama satu hari, lalu lakukan pengujian marshall

Pengujian marshall dan langkah kerja

Adapun langkah pengujian marshall sebagai berikut:

- 1) Menyiapkan alat Marshall lengkap
- 2) Menyiapkan benda uji yang telah disiapkan dalam keadaan bersih dan sudah diberi tanda kadar aspal
- 3) Jangkauan sorong digunakan untuk mengukur tinggi dan diameter setiap benda uji (ukur pada 3 sisi berbeda dan rata-ratakan)
- 4) Menimbang benda uji (berat benda uji kering)
- 5) Masukkan benda uji ke dalam air selama 24 jam pada suhu ruang
- 6) Menimbang berat SSD setelah benda uji dikeluarkan dari air dan dilap hingga kondisi SSD sesuai. Berat jenis curah (Bulk Specific Gravity) benda uji adalah:

$$BSG = \frac{\text{Berat Benda Uji}}{\text{Berat benda uji SSD} - \text{Berat benda uji dalam air}}$$

- 7) Menyiapkan alat stabilitas dan flow. Lakukan pembersihan pada batang penuntun (guide rode) serta bagian dalam kepala penekan agar bagian atas kepala penekan dapat bergerak secara benar.
- 8) Merendam sampel dalam bak perendam selama 30 hingga 40 menit pada suhu tetap 60°C.
- 9) Mengangkat objek uji dari bak perendam dan masukan ke dalam proving ring, selanjutnya pasang proving ring tersebut dan tempatkan pada benda uji.
- 10) Memasang arloji pengukur kelelahan (flow) dan mengatur keduanya. Sebelum pembebanan diberikan, naikan benda uji dan kepala penekan hingga menyentuh atas cincin penguji.
- 11) Menahan benda uji dengan kecepatan konstan hingga pembebanan menurun seperti yang ditunjukkan oleh jarum petunjuk. Catat beban maksimum yang terbaca.
- 12) Menganalisis data dilakukan terhadap hasil pengujian Marshall pada campuran aspal panas dengan variasi ukuran agregat dan suhu pencampuran 120°C, 140°C, dan 160°C:

Stabilitas

$$S = F_{\max} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana: S= Stabilitas Marshall (N atau kN) F_{\max} = gaya maksimum saat kegagalan

Flow

$$F = \Delta L \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

F = Deformasi total dari beban maksimum

ΔL = Perubahan sampel dari posisi awal

Marshall Quotient

$$MQ = \frac{S}{F}$$

Keterangan:

MQ = Nilai marshall quotient (kg/mm)

S = Nilai stabilitas (kg)

F = Nilai flow (Mm)

Persamaan VIM (Void in Mix)

$$VIM = 100 - \frac{G_{mm} \times G_{mb}}{G_m}$$

Keterangan:

VIM = Rongga udara pada campuran setelah pemadatan (%) G_{mm} = Berat jenis bulk agregat

G_{mb} = Berat jenis bulk campuran setelah pemadatan

Voids in Mineral Aggregate

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Keterangan:

VMA = Rongga udara pada mineral agregat (%)

G_{mb} = Berat jenis bulk campuran setelah proses pemadatan

G_{sb} = Berat jenis bulk agregat

P_s = Kandungan agregat (%)

Voids Filled with Asphalt

$$VFA = \frac{100 (VMA - VIM)}{VMA}$$

Keterangan:

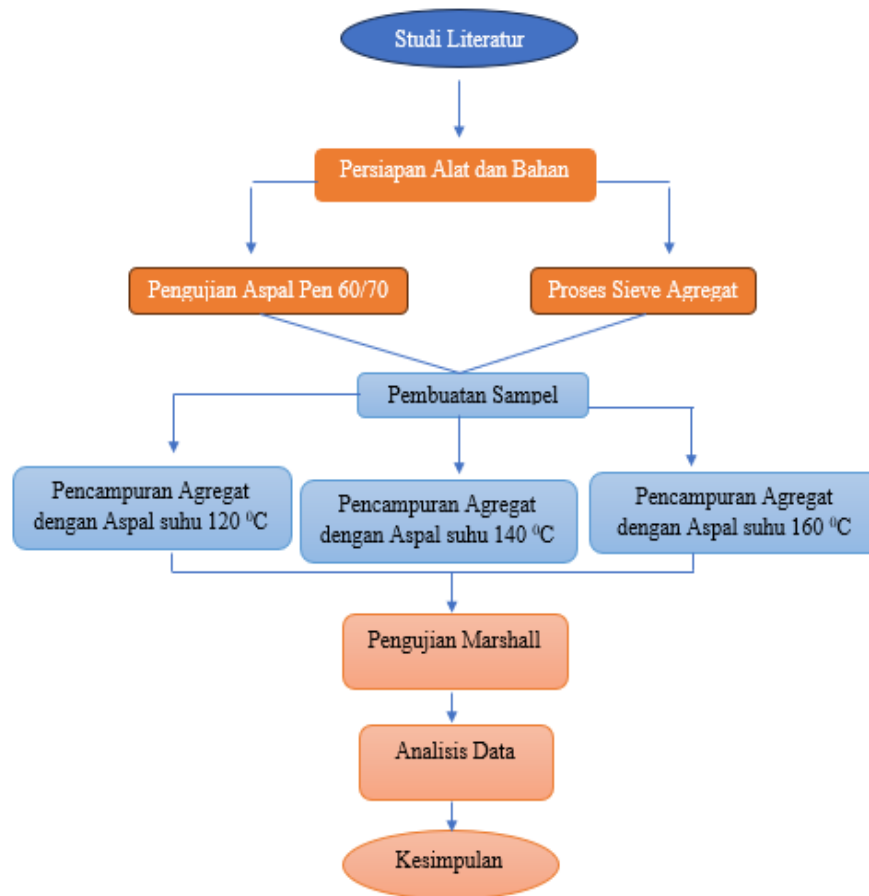
VFA = Rongga yang terisi aspal (%)

VIM = Rongga udara pada campuran (%)

VMA = Rongga udara pada mineral agregat (%)

Diagram alir

Diagram alir di bawah ini menguraikan langkah-langkah utama penelitian:



Gambar 2. Diagram Penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil tes di Laboratorium, pengujian kelayakan aspal pen 60/70 hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Hasil pengujian aspal pen 60/70.

No	Sifat aspal	Satuan	Pengujian berdasarkan penelitian	Persyaratan untuk pen 60/70	Keterangan
1	Penetrasi pada 25° C, 100 g, 5 detik	0,1 mm	65,9 mm	60-70	Memenuhi standar
2	Titik lembek (Softening Point)	°C	54 °C	48 – 56	Memenuhi standar
3	Daktilitas pada 25 °C	cm	150 °C	≥ 100	Memenuhi standar
4	Berat jenis pada 25 °C	gr/cm ³	1,4 gr/cm ³	≥ 1,0	Memenuhi standar

5	Titik nyala (Flash Point)	°C	339 °C	≥ 232	Memenuhi standar
6	Kehilangan berat setelah pemanasan (TFOT)	% berat	0,065%	$\leq 0,8$	Memenuhi standar

Dari hasil pengujian, di dapatkan bahwa aspal penetrasi 60/70 memenuhi standar yang di tetapkan bina marga 2018

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Bergradasi.

Temperatur	Stabilitas	Flow	MQ	VIM	VMA	VFA
120°C	985 kg	3,85 mm	256 kg	4,9%	16,3%	70,2%
140°C	1055 kg	3,56 mm	297 kg	4,3%	15,9%	72,5%
160°C	1107 kg	3,23 mm	343 kg	3,7%	15,3%	75,8%
Standar	>800 kg	2-4 mm	>250 kg	3-4 %	$\geq 15\%$	$\geq 65\%$

Pada campuran ukuran agregat gradasi, peningkatan suhu pencampuran dari 120 °C menjadi 160°C memiliki efek positif pada sifat mekanik campuran aspal. Hal ini ditunjukkan oleh Stabilitas yang lebih baik menunjukkan bahwa campuran dapat menahan tekanan dengan lebih baik. Aliran menurun, menunjukkan campuran yang menjadi lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi. Kuosien Marshall yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan kekuatan dan kekakuan campuran. Nilai VIM dan VMA yang menurun menunjukkan bahwa rongga dalam campuran semakin kecil karena pemadatan lebih baik. Ketika nilai VFA meningkat, itu berarti lebih banyak ruang agregat yang terisi aspal. Jadi, suhu 160 °C memberikan kinerja Marshall terbaik dibandingkan suhu lainnya karena menghasilkan stabilitas dan MQ tertinggi, serta struktur campuran yang lebih padat dan kuat. Secara khusus, suhu ini adalah pilihan terbaik karena menghasilkan nilai stabilitas dan MQ tertinggi, dan menciptakan struktur campuran yang lebih padat dan kuat daripada suhu lainnya.

Tabel 3. Hasil Pengujian Marshall Agregat Tanpa ukuran 0,5-1 cm (Medium).

Temperatur	Stabilitas	Flow	MQ	VIM	VMA	VFA
120°C	512 kg	5,2 mm	98 kg	8,0%	19,4%	58,6%
140°C	659 kg	5,04 mm	131 kg	7,2%	18,7%	61,4%
160°C	761 kg	4,73 mm	161 kg	6,6%	18,2%	63,8%
Standar	> 800 kg	2-4 mm	≥ 250 %	3-5%	$\geq 15\%$	$\geq 65\%$

Variasi ukuran tanpa medium (0,5–1 cm) menunjukkan bahwa pada ketiga suhu, campuran belum memenuhi standar. Nilai stabilitas 512 kg, 659 kg, dan 761 kg masih di bawah minimum 800 kg, sehingga daya dukung belum memadai. Nilai flow 5,2–4,73 mm melebihi batas 2–4 mm, menandakan campuran terlalu plastis. Nilai MQ 98, 131, dan 161 kg/mm juga di bawah syarat 250 kg/mm, menunjukkan kekakuan rendah. Nilai VIM 8,0–6,6% masih di atas spesifikasi 3–5%, sedangkan VFA 58,6–63,8% di bawah 65–75%, menandakan pengisian aspal belum optimal. Sementara itu, VMA 19,4–18,2% masih memenuhi syarat ($>15\%$). Secara

keseluruhan, meskipun suhu 160°C meningkatkan beberapa parameter, hasilnya tetap belum memenuhi spesifikasi Bina Marga.

Tabel 4. Hasil Pengujian Marshall Agregat Tanpa ukuran 1-2 cm.

Temperatur	Stabilitas	Flow	MQ	VIM	VMA	VFA
120°C	582 kg	5,22 mm	112kg	10,6%	21,7%	51,1%
140°C	608 kg	5,53 mm	110 kg	6,8%	18,4%	67,2%
160°C	787 kg	4,86 mm	162 kg	7,7%	19,1%	60,0 %
Standar	> 800 kg	2-4 mm	> 250 kg/	3-5%	≥ 15 %	≥ 65 %

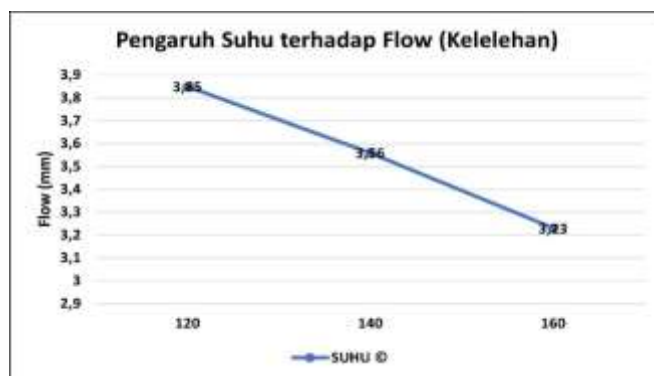
Variasi tanpa ukuran 1–2 cm menunjukkan bahwa pada ketiga suhu campuran belum memenuhi standar. Nilai stabilitas 582 kg (120°C), 608 kg (140°C), dan 787 kg (160°C) meningkat dengan suhu, tetapi masih di bawah minimum 800 kg. Nilai flow 5,22–4,86 mm melebihi batas 2–4 mm, menandakan campuran terlalu plastis. Nilai MQ 112, 110, dan 162 kg/mm juga di bawah syarat 250 kg/mm, menunjukkan kekakuan rendah. Nilai VIM 10,6–6,8–7,7% masih di atas spesifikasi 3–5%, menandakan rongga udara terlalu besar. Nilai VMA 21,7–18,4% masih memenuhi syarat (>15%). Untuk VFA, hanya suhu 140°C (67,2%) yang memenuhi spesifikasi, sedangkan 120°C (51,1%) dan 160°C (60,0%) masih di bawah batas. Meskipun suhu 160°C menunjukkan peningkatan stabilitas dan MQ, hasilnya tetap belum memenuhi spesifikasi.

Grafik Pengujian Marshall terhadap Ukuran variasi gradasi



Gambar 3. Pengaruh Suhu Terhadap Stabilitas Marshall Variasi Gradasi.

Jika suhu pencampuran meningkat dari 120°C → 140°C → 160°C, maka nilai stabilitas Marshall juga meningkat dari 985 kg → 1055 kg → 1107 kg. Hal ini terjadi karena suhu yang lebih tinggi membuat aspal lebih mudah melapisi agregat, sehingga ikatan antar agregat menjadi lebih kuat dan stabilitas campuran aspal meningkat.



Gambar 4. Pengaruh Suhu terhadap flow variasi gradasi.

Pada grafik perbandingan suhu terhadap flow (kelelehan) yaitu pada gambar di saat suhu 120 mendapatkan flow yaitu 3,85 mm, 3,56 mm dan 3,23 mm, dan sesuai dengan ketentuan spesifikasi bina marga, dimana jika flow menurun artinya aspal memiliki kekauan dan lebih tahan terhadap deformasi. Flow pada suhu 120, 140, dan 160 mengalami penurunan dimana semakin kecil nilai flow nya semakin bagus kekakuannya, tetapi tidak boleh lebih 2-3 mm.



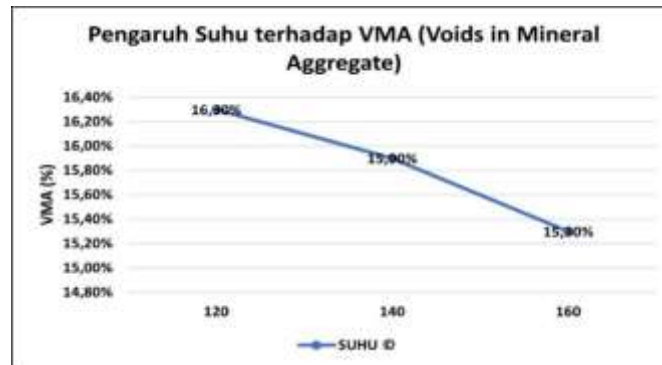
Gambar 5. Pengaruh Suhu terhadap MQ variasi gradasi.

Pada grafik di atas, dapat di interpretasikan bahwa jika MQ meningkat, maka campuran memiliki kekakuan yang baik dan meningkat. Pada grafik 5 yang dihasilkan meningkat, nilai yang tinggi di atas 250 kg, sesuai dengan standar bina marga 2018 dengan batas minimum 250 kg.



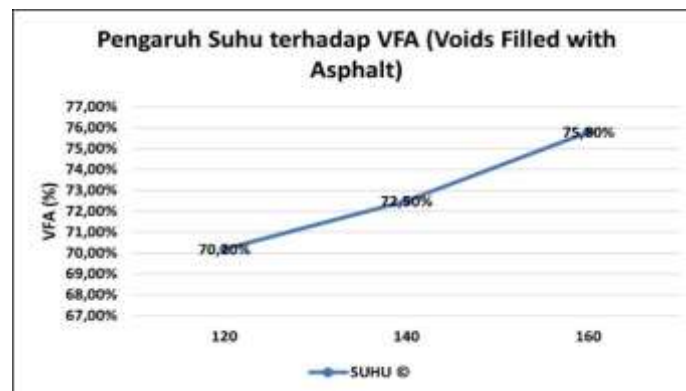
Gambar 6. Pengaruh Suhu dengan VIM Variasi Gradasi.

Jika suhu pencampuran meningkat dari $120^{\circ}\text{C} \rightarrow 140^{\circ}\text{C} \rightarrow 160^{\circ}\text{C}$, maka nilai VIM (Void in Mix) menurun dari $4,90\% \rightarrow 4,30\% \rightarrow 3,70\%$. Peristiwa ini terjadi karena suhu yang lebih tinggi membuat aspal lebih mudah mengalir dan mengisi rongga antar agregat, sehingga rongga udara dalam campuran menjadi lebih sedikit.



Gambar 7. Pengaruh Suhu dengan VMA Variasi Gradasi.

Jika suhu pencampuran meningkat dari $120^{\circ}\text{C} \rightarrow 140^{\circ}\text{C} \rightarrow 160^{\circ}\text{C}$, maka nilai VMA menurun dari $16,30\% \rightarrow 15,90\% \rightarrow 15,30\%$. Hal ini terjadi karena suhu yang lebih tinggi membuat aspal lebih mudah mengalir dan mengisi rongga antar agregat, sehingga ruang kosong dalam agregat (VMA) menjadi lebih kecil.



Gambar 8. Pengaruh Suhu dengan VFA Variasi Gradasi.

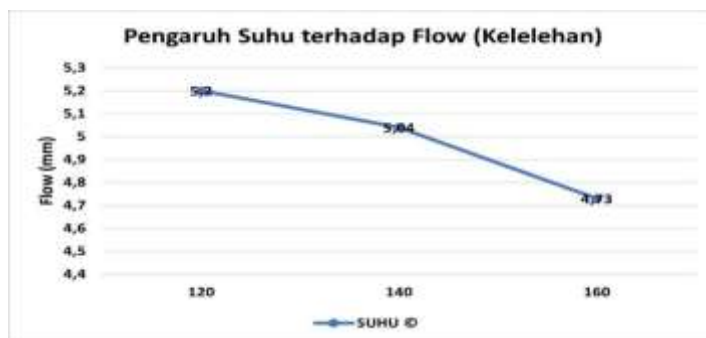
Jika nilai VFA meningkat, maka lebih banyak ruang agregat yang terisi aspal, grafik tersebut memenuhi standar Bina marga katrena dalam rentang yang di 65-75%.

Grafik Pengujian Marshall terhadap Variasi tanpa ukuran medium



Gambar 9. Pengaruh Suhu Terhadap Stabilitas Marshall Variasi tanpa ukuran medium.

Jika suhu pencampuran meningkat dari 120°C → 140°C → 160°C, maka nilai stabilitas Marshall juga meningkat dari 512 kg → 659 kg → 761 kg. Hasil dari pengujian stabilitas tanpa ukuran medium (0,5-1 cm) tidak memenuhi standar karena campurannya tidak mengikat dengan kuat.



Gambar 10. Pengaruh Suhu terhadap flow variasi tanpa ukuran medium.

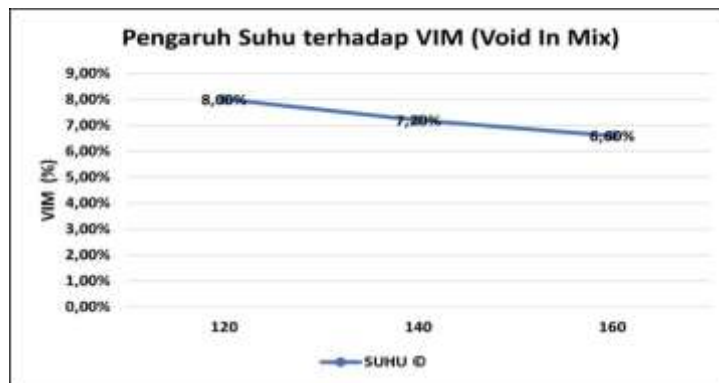
Pada grafik ke 10 dimana flow juga mengalami penurunan, akan tetapi aspal tidak masuk pada standar bina marga 2018 karena nilai stabilitas yang kecil, sehingga flow makin besar dan mengalami penurunan nilai tahan beban, akibatnya aspal makin plastis dan mudah mengalami deformasi.



Gambar 11. Pengaruh Suhu terhadap MQ variasi tanpa ukuran medium.

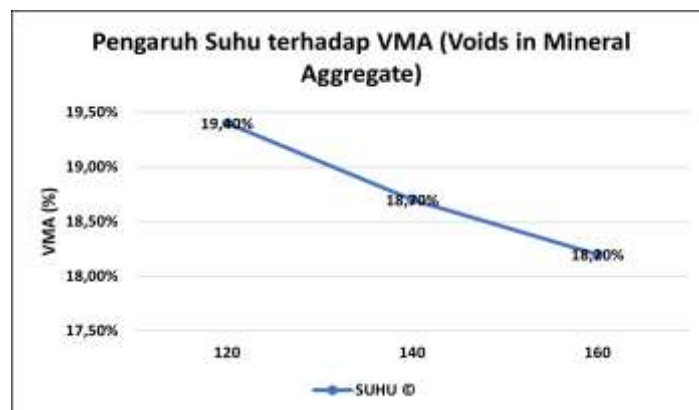
Pada gambar 11 grafik yang dihasilkan juga meningkat, tetapi nilai yang rendah di bawah 250, artinya nilai yang di hasilkan tidak memenuhi standar ASTM dan tidak memiliki

kekakuan yang baik, sehingga rentan terkena deformasi permanen (*rutting*).



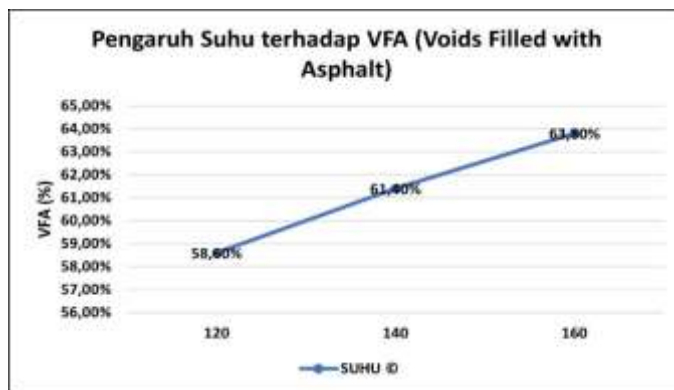
Gambar 12. Pengaruh Suhu dengan VIM Variasi tanpa ukuran Medium.

Jika suhu meningkat, maka nilai VIM menurun, tetapi masih tidak memenuhi SNI/Bina Marga karena nilainya masih terlalu tinggi. Hal ini menunjukkan rongga udara dalam campuran masih banyak, yang disebabkan oleh gradasi agregat kurang rapat atau pemadatan belum optimal.



Gambar 13. Pengaruh Suhu dengan VMA Variasi tanpa ukuran Medium.

Jika suhu pencampuran meningkat dari 120°C → 140°C → 160°C, maka nilai VMA menurun dari 19,40% → 18,70% → 18,20%. Hal ini terjadi karena suhu yang lebih tinggi membuat aspal lebih mudah mengalir dan mengisi rongga antar agregat, sehingga ruang kosong dalam agregat (VMA) menjadi lebih kecil. Namun pada pengujian tanpa campuran ukuran 0,5-1 cm tidak memenuhi standar, karena rongga antar agregat dalam campuran aspal menjadi terlalu banyak.



Gambar 14. Pengaruh Suhu dengan VFA Variasi tanpa ukuran Medium.

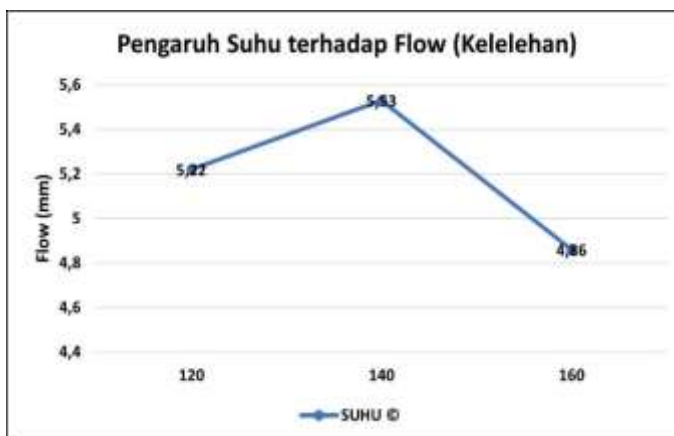
Jika nilai VFA meningkat, maka lebih banyak ruang agregat yang terisi aspal, grafik tersebut tidak memenuhi standar Bina marga katrena dalam rentang kurang dari 65%.

Grafik Pengujian Marshall terhadap Variasi tanpa ukuran 1-2cm



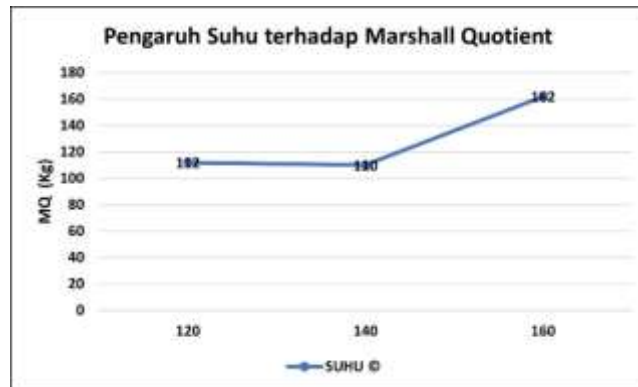
Gambar 15. Pengaruh Suhu Terhadap Stabilitas Marshall Variasi tanpa ukuran 1-2 cm.

Jika suhu pencampuran meningkat dari 120°C → 140°C → 160°C, maka nilai stabilitas Marshall juga meningkat dari 582 kg → 609 kg → 787 kg. Hasil dari pengujian stabilitas tanpa ukuran medium (0,5-1 cm) tidak memenuhi standar Bina karena tidak menggunakan ukuran 0,5-1 cm, sehingga campurannya tidak mengikat dengan kuat.



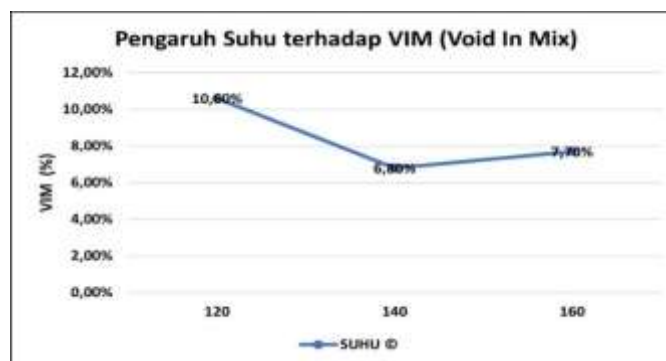
Gambar 16. Pengaruh suhu terhadap flow variasi tanpa ukuran 1-2 cm.

Pada grafik 16 flow mengalami penurunan, walaupun pada suhu 140 °C mengalami peningkatan, akan tetapi aspal tidak masuk pada standar bina marga 2018 karena nilai stabilitas yang kecil, sehingga flow makin besar dan mengalami penurunan nilai tahan beban, akibatnya aspal makin plastis dan mudah mengalami deformasi.



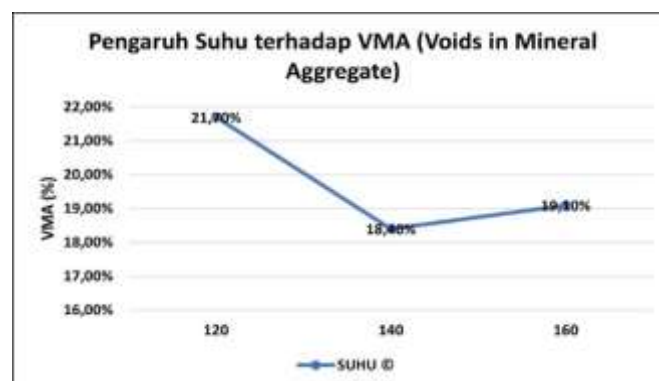
Gambar 17. Pengaruh Suhu terhadap MQ variasi tanpa ukuran 1-2 cm.

Pada gambar 17 mengalami keadaan peningkatan, tetapi kurang dari 250 kg dan tidak memiliki kekakuan yang baik dan rentan terhadap keretakan.



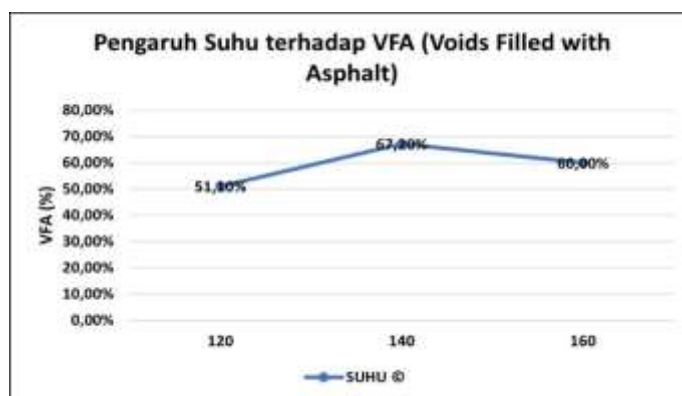
Gambar 18. Pengaruh Suhu dengan VIM Variasi tanpa ukuran 1-2 cm.

Jika suhu meningkat, maka nilai VIM menurun, tetapi masih tidak memenuhi SNI/Bina Marga karena nilainya masih terlalu tinggi. Hal ini menunjukkan rongga udara dalam campuran belum terisi, yang disebabkan oleh gradasi agregat kurang rapat atau pemadatan belum optimal.



Gambar 19. Pengaruh Suhu dengan VMA Variasi tanpa ukuran 1-2 cm.

Jika suhu pencampuran meningkat dari 120°C → 140°C → 160°C, maka nilai VMA menurun dari 21,70% → 18,40% → 19,10%. Hal ini terjadi karena suhu yang lebih tinggi membuat aspal lebih mudah mengalir dan mengisi rongga antar agregat, sehingga ruang kosong dalam agregat (VMA) menjadi lebih kecil. Namun pada pengujian tanpa campuran ukuran 1-2 cm tidak memenuhi standar, karena rongga antar agregat dalam campuran aspal menjadi terlalu banyak.



Gambar 20. Pengaruh Suhu dengan VFA Variasi Non ukr. 1-2 cm.

Jika nilai VFA meningkat, maka lebih banyak ruang agregat yang terisi aspal, grafik tersebut tidak memenuhi standar Bina marga karena dalam rentang kurang dari 65%.

Dari grafik perbandingan stabilitas Marshall, pada campuran agregat gradasi kenaikan suhu dari 120°C ke 160°C memberikan efek positif terhadap sifat mekanik. Stabilitas meningkat, menunjukkan kemampuan menahan beban lebih baik. Nilai flow menurun, menandakan campuran lebih kaku dan tahan deformasi. MQ meningkat, menunjukkan kekuatan dan kekakuan yang lebih baik. Nilai VIM dan VMA menurun, menandakan rongga semakin kecil akibat pemadatan yang lebih baik, sementara VFA meningkat yang berarti rongga agregat lebih terisi aspal. Suhu 160 °C memberikan kinerja Marshall terbaik dibandingkan suhu lainnya karena menghasilkan stabilitas dan MQ tertinggi. Di sisi lain pada grafik ke 2 dan ke 3 mengalami penurunan nilai stabilitas yaitu pada ukuran agregat non medium dan tanpa 1-2, campuran cenderung plastis dan mudah mengalami deformasi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan pengujian, kadar aspal optimum AC-WC adalah 6%. Kenaikan suhu menyebabkan VIM dan VMA menurun, sedangkan VFA, stabilitas, dan MQ meningkat. Hasil menunjukkan bahwa pada suhu 120°C, 140°C, dan 160°C dengan gradasi agregat, campuran memenuhi spesifikasi Marshall. Sebaliknya, pada variasi non medium, meskipun tren

parameter serupa, nilainya tidak memenuhi standar karena distribusi ukuran agregat yang tidak lengkap.

Suhu 160 °C memberikan kinerja Marshall terbaik dibandingkan suhu lainnya karena menghasilkan stabilitas dan MQ tertinggi. Di sisi lain pada grafik tanpa ukuran 0,5-1 cm dan tanpa ukuran 1-2cm mengalami penurunan nilai stabilitas dan campuran cenderung plastis dan mudah mengalami deformasi

Saran

Sebagai saran, penelitian selanjutnya sebaiknya fokus pada penggunaan agregat gradasi dengan optimasi temperatur pencampuran, serta meneliti variasi kadar aspal atau penggunaan bahan tambahan untuk meningkatkan kinerja campuran agar lebih memenuhi standar. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pemilihan campuran aspal yang efektif dan tahan lama untuk perkerasan jalan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dengan tulus menyampaikan rasa terima kasih kepada Jurusan Fisika, khususnya Jurusan Material di Universitas Negeri Padang, atas dukungan dalam menyelesaikan penelitian ini, sehingga penelitian ini berjalan dengan lancar.

DAFTAR REFERENSI

- Berutu, G. F., Nasjono, J. K., & Frans, J. H. (2023). Pengaruh variasi suhu pada campuran HRS-base menggunakan filler tanah putih terhadap pengujian Marshall. *Jurnal Forum Teknik Sipil*, 3(1), 49–55. <https://doi.org/10.35508/forteks.v3i1.9781>
- Cheng, Y., Li, H., Li, L., Zhang, Y., Wang, H., & Bai, Y. (2019). Viscoelastic properties of asphalt mixtures with different modifiers at different temperatures based on static creep tests. *Applied Sciences*, 9(20), 4246. <https://doi.org/10.3390/app9204246>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi umum bina marga 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan (Revisi 2)*. Ministry of Public Works and Housing.
- Dotulung, V., Lalamentik, L. G. J., & Palenewan, S. C. N. (2023). Analisis variasi gradasi agregat gabungan terhadap karakteristik. *TEKNO*, 21(85).
- Hamedi, G. H., Dehnad, M. H., & Asadi, A. H. (2025). Evaluating mechanical and thermodynamic properties of asphalt mixtures containing anti-freezing agents against low temperature cracking. *Scientific Reports*, 15(1), 1–29. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11381-4>
- Ibrahim, Z., Said, L. B., & Alifuddin, A. (2021). Analisis Poisson ratio dan ketahanan deformasi campuran AC-WC substitusi pasir silika. *Jurnal Macca*. <https://doi.org/10.33096/jtasm.v6i1.277>
- Jihad, A., & Kadir, H. (2024). Analisis pengaruh variasi ukuran butiran agregat kasar terhadap karakteristik campuran aspal beton.

- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2013). A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 423–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.033>
- Pratama, N. G., & Haratama, K. R. (2023). Studi komparasi karakteristik dan nilai daktilitas aspal modifikasi PG 70 dengan aspal Pertamina penetrasi 60/70. *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 2(2), 184–189. <https://doi.org/10.26740/mitrans.v2n2.p183-189>
- Riski, M., Kurniasari, F. D., & Bunyamin. (2021). The effect of mixing natural aggregates with artificial aggregates on Marshall parameters. *Jurnal Inotera*, 6(1), 10–19. <https://doi.org/10.31572/inotera.vol6.iss1.2021.id135>
- Sarroukh, M., Lahlou, K., & Farah, M. (2021). Effect of the bitumen type on the temperature resistance of hot mix asphalt. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7428–7431. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.683>
- Siahaya, J., Mulyono, A. T., & Setyawan, A. (2023). Kinerja campuran asphalt concrete-wearing course (AC-WC) terhadap karakteristik Marshall pada perkerasan jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 85–92.
- Sukirman, S. (2016). *Perkerasan lentur jalan raya*.
- Wang, S., Yu, W., Miao, Y., & Wang, L. (2023). Review on load transfer mechanisms of asphalt mixture meso-structure. *Materials*, 16(3), 1280. <https://doi.org/10.3390/ma16031280>
- Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S. W., & Mills-Beale, J. (2019). Rheological properties and modeling of asphalt binders and intermediate temperature range.