



Pengaruh Penambahan Aspal Buton pada Aspal Pen 60/70 terhadap Sifat Mekanik pada Lapisan Permukaan AC-WC

Shilvhania Usman^{1*}, Yenni Darvina², Leni Aziyus Fitri³, Fandi Oktasendra⁴

¹⁻⁴Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: shilvhania@gmail.com

Abstract. *This study aims to determine the effect of adding Buton Asphalt on the mechanical properties of Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) mixtures based on Marshall test parameters. The variations of asphalt content used were 0%, 2%, and 5%. Each variation was tested using the Marshall method to obtain the values of Stability, Flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), and Marshall Quotient (MQ). The results show that the addition of Buton Asphalt affects the improvement of the mixture characteristics. The highest stability value was obtained at 5% Buton Asphalt content, which was 1,074 kg, while the lowest flow value was also found at 5%, which was 2.48 mm, indicating that the mixture becomes stiffer and more stable. The VIM value decreased from 4.7% at 0% content to 4.2% at 5% content, indicating that the air voids in the mixture became smaller. The VMA value also decreased from 16.2% at 0%, 15.8% at 2%, and 15.1% at 5%, while the VFA value increased from 71% to 72.18%. The highest Marshall Quotient (MQ) value was obtained at 5% Buton Asphalt content, which was 433 kg/mm, indicating that the mixture has better stiffness and resistance to deformation. Based on these results, it can be concluded that the addition of 5% Buton Asphalt provides the best mixture characteristics for the AC-WC layer.*

Keywords: AC-WC; Buton Asphalt B5/20; Marshall Test; Mechanical Properties; Penetration Asphalt 60/70.

Abstrak. Riset ini mempunyai tujuan guna menyelidiki dampak penambahan Aspal Buton terhadap sifat mekanik campuran Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) berdasarkan parameter uji marshall. Variasi kadar aspal yang dipakai yaitu 0%, 2%, dan 5%. Masing-masing variasi kadar dilakukan tes memakai metode Marshall untuk memperoleh nilai Stabilitas, Flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil riset memperlihatkan bahwasanya penambahan Aspal Buton memberikan pengaruh terhadap peningkatan karakteristik campuran. Nilai stabilitas paling tinggi diperoleh dalam kadar Aspal Buton 5% yakni sejumlah 1.074 kg, sedangkan nilai flow terendah juga terdapat pada kadar 5% yaitu sebesar 2,48 mm yang menunjukkan campuran lebih kaku dan stabil. Nilai VIM mengalami penurunan dari 4,7% pada kadar 0% menjadi 4,2% pada kadar 5%, yang menunjukkan rongga udara dalam campuran semakin kecil. Nilai VMA juga menurun dari 16,2% pada kadar 0%, 15,8 % pada kadar 2 % dan 15,1% pada kadar 5 %, sedangkan nilai VFA meningkat dari 71% menjadi 72,18%. Nilai Marshall Quotient (MQ) paling tinggi diperoleh dalam kadar Aspal Buton 5% sebesar 433 kg/mm yang memperlihatkan campuran memiliki kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi yang lebih baik. Berlandaskan atas hasil tersebut mampu ditarik kesimpulan bahwasanya penambahan Aspal Buton sebesar 5% memberikan karakteristik campuran terbaik pada lapisan AC-WC.

Kata kunci: Aspal Buton B5/20; Aspal Pen 60/70; Lapisan AC-WC; Sifat Mekanik; Uji Marshall.

1. LATAR BELAKANG

Jalan adalah infrastruktur transportasi yang sangat penting guna menunjang mobilitas manusia serta distribusi barang dan jasa. Kualitas jalan yang baik harus mampu memberikan keamanan, kenyamanan, dan ketahanan terhadap beban lalu lintas serta dampak lingkungan. Dalam perencanaan perkerasan jalan beraspal, campuran aspal harus memenuhi sejumlah parameter teknis seperti halnya stabilitas, kelelahan (flow), serta karakteristik volumetrik seperti Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Asphalt (VFA). Parameter ini biasanya dianalisis melalui metode Marshall untuk memastikan campuran aspal memenuhi spesifikasi teknis perkerasan jalan (Insani et al., 2025).

Pada kondisi ideal, lapisan perkerasan jalan beraspal harus memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) agar memiliki kekuatan, keawetan, dan stabilitas yang baik. Berdasarkan SNI 8135:2015 yang berkaitan dengan Spesifikasi Aspal Keras Berdasarkan Kelas Penetrasi, aspal yang dipakai dalam campuran beraspal panas wajib mencukupi syarat nilai penetrasi, titik lembek, berat jenis, serta daktilitas sesuai batas standar yang ditetapkan, agar diperoleh daya lekat yang baik antara aspal dan agregat (Nasional, 2015). Contoh dari jenis aspal yang banyak dipakai dan sesuai standar tersebut adalah Aspal Pen 60/70, dikarenakan mempunyai tingkat kekerasan serta elastisitas yang cocok dengan kondisi iklim tropis di Indonesia (Raharja et al., 2017) .

Pada kondisi nyata di lapangan, kerusakan jalan seperti retak, alur (rutting), dan lubang masih sering terjadi. Perihal tersebut mampu ditimbulkan karena sejumlah aspek, yakni meningkatnya volume kendaraan berat, kualitas material yang kurang optimal, serta pengaruh iklim tropis yang dapat mempercepat degradasi lapisan perkerasan. Selain itu, kebutuhan aspal di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya, sementara produksi aspal minyak dalam negeri belum sanggup memenuhi seluruh kebutuhan alhasil sebagian masih harus dipenuhi melalui impor (Rohma et al., 2023). Kondisi tersebut mendorong perlunya pemanfaatan sumber daya lokal sebagai alternatif bahan pengikat dalam campuran aspal guna meningkatkan kinerja perkerasan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap aspal impor. Kondisi tersebut mendorong perlunya pemanfaatan sumber daya lokal sebagai alternatif bahan pengikat dalam campuran aspal guna meningkatkan kinerja perkerasan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap aspal impor.

Contoh SDA yang potensial guna dimanfaatkan dalam campuran aspal adalah Aspal Buton (Asbuton) yang berasal dari Pulau Buton, Sulawesi Tenggara. Aspal Buton ialah aspal alam yang mengandung bitumen dan mineral yang dapat digunakan sebagai bahan tambahan atau substitusi dalam campuran beraspal. Namun, pemakaian Aspal Buton dalam campuran aspal perlu dikaji lebih lanjut karena variasi kadar yang digunakan dapat mempengaruhi karakteristik mekanik campuran seperti stabilitas, flow, serta nilai rongga dalam campuran (Insani et al., 2025). Jika kadar yang digunakan tidak tepat, campuran aspal dapat menjadi terlalu kaku atau sebaliknya menjadi terlalu lunak sehingga dapat menurunkan kinerja perkerasan jalan.

Riset selanjutnya memperlihatkan bahwasanya pemakaian Asbuton LGA pada campuran AC-WC dengan aspal penetrasi 60/70 mampu menghasilkan parameter Marshall yang masih mencukupi spesifikasi Bina Marga, dengan nilai stabilitas sekitar 1008–1069 kg dan nilai VIM 3,5–4,9% pada variasi kadar Asbuton tertentu (Yovita M. Mendrofa, 2024).

Selain itu, penelitian Budi dan Supriyanto (2025) menyatakan bahwa penambahan Asbuton LGA B50/30 pada campuran AC-WC dapat meningkatkan stabilitas dan durabilitas campuran, dengan kadar Asbuton optimum sekitar 2,85% dan nilai indeks kekuatan sisa mencapai 90,31% sesuai standar Bina Marga (Reznadya et al., 2025).

Penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya yaitu menganalisis dampak penambahan Asbuton tipe BGA 5/20 terhadap karakteristik campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) hasil penelitian memperlihatkan bahwasanya penambahan Asbuton BGA 5/20 mampu menaikkan nilai stabilitas serta Marshall Quotient dalam campuran AC-WC, dimana kadar sekitar 3% memberikan kinerja campuran yang paling optimal karena masih memenuhi spesifikasi parameter Marshall yang dipersyaratkan (Batubara, 2021) Kebaruan penelitian terletak pada penggunaan Aspal Pen 60/70 yang dimodifikasi melalui penambahan Asbuton B5/20 pada campuran AC-WC dengan variasi kadar tertentu untuk menganalisis perubahan sifat mekanik campuran secara lebih komprehensif. Selain itu, penelitian ini menggunakan material agregat dari sumber lokal yang berbeda serta dilakukan pada kondisi laboratorium yang berbeda sehingga diharapkan dapat memberikan informasi baru mengenai karakteristik dan kinerja campuran AC-WC yang lebih optimal.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan penelitian yang menganalisis pengaruh penambahan Aspal Buton terhadap karakteristik mekanik campuran aspal. Riset ini dilaksanakan dengan menggunakan campuran AC-WC serta aspal penetrasi 60/70 untuk bahan pengikat utama dengan variasi kadar Aspal Buton tertentu. Melalui pengujian Marshall, dapat diketahui parameter stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), serta karakteristik volumetrik campuran yang dihasilkan. Hasil riset ini harapannya mampu memberi informasi yang berkaitan dengan dampak penambahan Aspal Buton terhadap sifat mekanik campuran aspal sehingga dapat menjadi alternatif material yang efektif dalam konstruksi perkerasan jalan.

2. KAJIAN TEORITIS

Pengerasan Jalan

Perkerasan jalan ialah struktur yang memiliki fungsi guna menyalurkan beban lalu lintas dari permukaan jalan ke lapisan tanah dasar secara aman. Pada perkerasan lentur, lapisan permukaan biasanya menggunakan campuran beraspal panas yang terdiri dari agregat, filler, serta bahan pengikat aspal. Campuran tersebut dirancang agar memiliki kekuatan, stabilitas, serta ketahanan terhadap deformasi dan kerusakan akibat beban lalu lintas maupun pengaruh lingkungan. Maka dari itu, kualitas campuran aspal sangatlah menentukan kinerja perkerasan jalan dalam jangka panjang (Pulungan et al., 2025).

Selain itu, campuran beraspal panas digunakan secara luas pada konstruksi jalan karena memiliki sifat kedap air, daya tahan yang baik, serta sanggup menahan beban lalu lintas ringan hingga berat. Karakteristik campuran aspal harus memenuhi spesifikasi tertentu agar lapisan perkerasan memiliki stabilitas struktural yang baik dan tidak mudah terjadi kerusakan seperti halnya retak, alur, maupun deformasi permanen (Yasruddin, 2024).

Lapisan AC-WC

Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) merupakan lapisan permukaan dalam perkerasan lentur yang langsung menerima beban lalu lintas serta dampak lingkungan. Lapisan ini memiliki fungsi guna memberi permukaan yang halus, kedap air, serta mampu menahan gaya geser dan tekanan kendaraan. Maka dari itu, campuran AC-WC harus mempunyai stabilitas yang tinggi serta ketahanan terhadap deformasi permanen agar mampu mempertahankan kinerja jalan dalam jangka waktu yang lama (Hady & Muqhnita Yusputri, 2022).

Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) ialah lapisan permukaan yang memiliki fungsi untuk lapisan aus dan langsung menerima beban lalu lintas serta pengaruh lingkungan. Maka dari itu, AC-WC harus mempunyai stabilitas tinggi, ketahanan terhadap keausan, dan kedap terhadap air

Kinerja lapisan AC-WC biasanya dievaluasi menggunakan metode Marshall yang memberikan hasil berupa sejumlah parameter penting seperti stabilitas, flow, VIM, VMA, dan Marshall Quotient. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk menilai kekuatan, fleksibilitas, serta kepadatan campuran aspal sehingga dapat diketahui apakah campuran tersebut memenuhi spesifikasi teknis yang berlaku (Putra et al., 2023).

Aspal Penetrasi 60/70

Aspal penetrasi 60/70 merupakan salah satu tipe aspal minyak yang paling umum dipakai pada konstruksi perkerasan jalan di Indonesia. Angka penetrasi memperlihatkan tingkat kekerasan aspal, dimana nilai 60/70 menunjukkan tingkat konsistensi sedang sehingga cocok digunakan pada daerah beriklim tropis. Aspal jenis ini memiliki sifat adhesi yang baik terhadap agregat serta mampu memberikan fleksibilitas pada campuran beraspal (Rahmat et al., 2021).

Namun demikian, penggunaan aspal minyak dalam jumlah besar menimbulkan ketergantungan terhadap impor bahan baku. Maka dari itu, dibutuhkan alternatif bahan pengikat atau bahan tambah yang mampu menaikkan kinerja campuran sekaligus mengurangi penggunaan aspal minyak, salah satunya ialah aspal alam dari Pulau Buton (Asbuton) (Dairi & Pratama, 2024).

Aspal Buton

Aspal Buton atau Asbuton ialah aspal alam yang berasal dari Pulau Buton, Sulawesi Tenggara. Material ini mengandung bitumen alami yang bercampur dengan mineral sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambah atau substitusi sebagian aspal minyak dalam campuran beraspal. Pemanfaatan Asbuton menjadi salah satu upaya untuk memanfaatkan sumber daya lokal sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap aspal impor (Yasruddin, 2024).

Penambahan Asbuton dalam campuran beraspal mampu menaikkan nilai stabilitas campuran dikarenakan kandungan mineral dan bitumen di dalamnya dapat memperkuat ikatan antara agregat dan aspal. Selain itu, penggunaan Asbuton juga dapat memperbaiki karakteristik mekanik campuran seperti stabilitas serta Marshall Quotient alhasil campuran menjadi lebih memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap beban lalu lintas (Alfarizi et al., 2025).

Selain itu, penggunaan bahan modifikasi seperti Asbuton dapat meningkatkan performa AC-WC. Campuran yang memakai Asbuton terbukti memiliki sifat teknis yang lebih baik dibandingkan campuran konvensional (Islah et al., 2024).

Riset lainnya juga memperlihatkan bahwasanya pemakaian Asbuton pada AC-WC menghasilkan karakteristik yang memenuhi spesifikasi Bina Marga pada berbagai variasi kadar (Assiddiqie et al., 2025).

Sifat Mekanik

Sifat mekanik campuran aspal menggambarkan kemampuan campuran ketika menahan beban lalu lintas serta deformasi sepanjang masa pelayanan. Parameter mekanik yang umum digunakan dalam tes Marshall yakni stabilitas, flow, rongga udara dalam campuran (VIM), rongga dalam agregat (VMA), serta Marshall Quotient (MQ). Nilai-nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi kekuatan, kelenturan, dan kepadatan campuran beraspal (Hady & Muqhnita Yusputri, 2022).

Sifat mekanik campuran aspal umumnya dievaluasi memakai metode Marshall. Parameter utama mencakup atas stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient (MQ).

Stabilitas menunjukkan kemampuan campuran aspal guna menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen, sedangkan flow memperlihatkan tingkatan kelelahan ataupun deformasi plastis pada campuran. Marshall Quotient ialah perbandingan antara stabilitas dan flow yang memperlihatkan tingkat kekakuan campuran. Nilai parameter tersebut sangatlah diberi pengaruh berlandaskan komposisi agregat, kadar aspal, dan penggunaan bahan tambah seperti Asbuton (Kurnia et al., 2025).

Stabilitas ialah kekuatan campuran aspal dalam menahan beban maksimum sebelum mengalami keruntuhan. “Nilai stabilitas menunjukkan kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen”. Makin tingginya nilai stabilitas, alhasil campuran makin kokoh ketika menahan beban kendaraan (Wenny, 2024).

Flow ialah besaran deformasi plastis yang ditemukan ketika campuran sampai pada beban maksimum. “Nilai flow menunjukkan tingkat fleksibilitas campuran aspal terhadap deformasi akibat beban berulang”. Nilai flow yang terlalu besar menunjukkan campuran terlalu plastis, sementara nilai yang terlalu kecil menunjukkan campuran terlalu kaku (Ra et al., 2022).

Marshall Quotient ialah perbandingan antara stabilitas dan flow yang menunjukkan tingkat kekakuan campuran. “Marshall Quotient digunakan untuk mengevaluasi kekakuan campuran, dimana nilai tinggi menunjukkan campuran yang lebih kaku dan tahan deformasi”(Akhbar et al., 2019).

VIM adalah persentase rongga udara pada campuran beraspal selepas pemadatan. “VIM yang terlalu besar dapat menyebabkan masuknya air dan udara sehingga menurunkan durabilitas campuran”, di sisi lain, VIM yang terlalu kecil mampu mengakibatkan bleeding (Salsabilla et al., 2022).

VMA ialah volume rongga antar butir agregat dalam campuran yang terisi aspal dan udara. “Nilai VMA menunjukkan ruang yang tersedia untuk aspal dalam campuran sehingga sangat mempengaruhi kekuatan dan keawetan perkerasan”(Adwang, 2020).

VFA ialah persentase rongga dalam agregat yang terisi oleh aspal. “Nilai VFA menggambarkan seberapa besar rongga agregat yang terisi aspal, yang berpengaruh terhadap kedap air dan durabilitas campuran”(Ra et al., 2022).

Campuran Komposit pada Campuran Aspal

Campuran komposit ialah material yang dihasilkan oleh dua ataupun lebih bahan berbeda yang dilakukan penggabungan guna memberikan hasil berupa sifat mekanik yang lebih baik daripada setiap bahan penyusunnya. Pada material komposit terdapat dua elemen utama yakni matriks serta penguat (reinforcement). Dalam campuran perkerasan jalan beraspal, aspal berfungsi sebagai matriks pengikat sedangkan agregat bertindak sebagai material penguat yang memberikan kekuatan struktural pada campuran (Iman Adiwidodo et al., 2023). Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi antara bahan pengikat dan agregat membentuk sistem material yang mampu menahan beban lalu lintas serta memberikan ketahanan terhadap deformasi permanen pada perkerasan jalan.

Dalam campuran beraspal panas, konsep komposit terlihat dari interaksi antara agregat, filler, dan bahan pengikat aspal yang membentuk satu kesatuan material. Kombinasi tersebut

menghasilkan karakteristik mekanik tertentu seperti stabilitas, fleksibilitas, serta ketahanan terhadap rusaknya beban lalu lintas. Oleh karena itu, perubahan komposisi salah satu material penyusun campuran dapat mempengaruhi sifat mekanik keseluruhan campuran beraspal (Dairi & Pratama, 2024).

Salah satu bentuk modifikasi campuran komposit pada perkerasan jalan adalah dengan menambahkan Aspal Buton (Asbuton) pada campuran aspal minyak seperti Aspal Penetrasi 60/70. Asbuton adalah aspal alam yang mengandung bitumen serta mineral sehingga mampu dipakai untuk bahan tambah ataupun substitusi sebagian aspal minyak. Pemakaian Asbuton dalam campuran AC-WC bertujuan untuk meningkatkan stabilitas, kekakuan, serta daya tahan campuran terhadap beban lalu lintas (Rohma et al., 2023).

Sejumlah riset memperlihatkan bahwasanya penambahan Asbuton mampu menaikkan nilai stabilitas dan karakteristik Marshall dalam campuran AC-WC. Perihal tersebut dikarenakan kandungan bitumen alami dalam Asbuton yang mampu meningkatkan daya ikat antara agregat dan aspal sehingga campuran menjadi lebih kuat dan tahan terhadap deformasi. Di sisi lain, pemakaian Asbuton juga mampu menurunkan ketergantungan terhadap aspal minyak impor dan menggunakan sumber daya alam lokal yang melimpah di Indonesia (Rohma et al., 2023).

Penelitian lain memperlihatkan bahwasanya campuran AC-WC dengan penambahan Asbuton mampu mencukupi spesifikasi teknis perkerasan jalan berdasarkan parameter Marshall seperti stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFA. Variasi kadar Asbuton tertentu bahkan memberikan nilai stabilitas yang besar daripada campuran tanpa Asbuton, sehingga penggunaan material ini berpotensi meningkatkan performa lapisan permukaan jalan (Mendrofa et al., 2024).

Dengan demikian, penggunaan Asbuton pada campuran AC-WC dapat dikategorikan sebagai sistem material komposit, karena terjadi kombinasi antara aspal minyak dan aspal alam yang menghasilkan karakteristik mekanik baru yang lebih baik. Pendekatan ini menjadi salah satu inovasi dalam teknologi perkerasan jalan guna menambahkan kualitas dan umur layanan perkerasan jalan (Puji Leksono & Ilham Ardhi, 2024).

3. METODE PENELITIAN

Riset ini ialah riset eksperimen kuantitatif di laboratorium Dinas Bina Marga, Cipta Karya dan Tata Ruang (BMCKTR) Sumatera Barat dengan tujuan mengetahui Pengaruh Variasi Jenis Aspal Pen 60/70 dan Aspal Buton Terhadap Sifat Mekanik pada Lapisan Permukaan Aspal AC-WC Menggunakan Agregat Batu Pecah.

Sampel Pengujian

Sampel yang dipakai pada riset ini yakni Aspal Pen 60/70 dan Aspal Buton.

Alat

Adapun alat yang dipakai pada tes mencakup atas Saringan Bertingkat, Timbangan Analitik, Oven Laboratorium, *Kettle/Heater* Aspal, Termometer, *Waterbath*, Cetakan Marshall, Picnometer, *Marshall Mechanical Compactor*, *Marshall Test*, *Asphalt Penetrometer*, Alat *Ductility Test Machine*, Alat titik lembek, Alat Uji titik nyala dan titik bakar aspal, Perlengkapan Pendukung (APD).

Bahan

Material yang dipakai dalam riset ini mencakup atas Agregat Kasar, Agregat Halus (Abu Batu), aspal penetrasi, dan Aspal Buton (Asbuton). Agregat kasar terdiri dari 2 ukuran yaitu agregat kasar berukuran 0,5 hingga 1 cm dan agregat kasar berukuran 1 hingga 2 cm. Agregat Kasar dan agregat halus didapatkan melalui sumber material yang digunakan pada pekerjaan perkerasan jalan serta sudah mencukupi syarat spesifikasi dari Bina Marga. Agregat Halus yang dipakai berwujud abu batu yang berfungsi untuk mengisi rongga pada campuran aspal. Bahan pengikat yang dipakai ialah aspal penetrasi dengan karakteristik yang memenuhi standar Badan Standardisasi Nasional melalui standar SNI 8135:2015 terkait spesifikasi aspal keras berlandaskan atas kelas penetrasi. Selain itu, digunakan pula Aspal Buton (Asbuton) tipe B 5/20 sebagai bahan tambahan dalam campuran.

Prosedur Kerja

Pengujian Aspal Pen 60/70

Proses pembuatan sampel dilakukan dengan melakukan pra penelitian dengan melakukan pengujian aspal murni terlebih dahulu guna menyelidiki karakteristik dasar aspal sebelum dipakai untuk bahan pengikat dalam campuran agregat. Tes yang dijalankan mencakup atas tes penetrasi, tes titik lembek (*softening point*), tes daktilitas, tes titik nyala, kehilangan berat aspal serta tes berat jenis. Tes tersebut mempunyai tujuan guna memastikan bahwa aspal yang dipakai telah mencukupi persyaratan yang ditentukan oleh Badan Standardisasi Nasional sesuai dengan standar SNI 8135:2015 terkait spesifikasi keras berlandaskan atas kelas penetrasi. Berikut tabel standar spesifikasi tes aspal pen 60/70 (Nasional, 2015).

Tabel 1. Speksifikasi Pengujian Aspal.

No	Sifat aspal	Satuan	Persyaratan untuk pen 60/70	SNI
1	Penetrasi pada 25 ^o C, 100 g, 5 detik	0,1 mm	60-70	SNI 06-2456- 1991
2	Titik lembek (Softening Point)	°C	48 – 56	SNI 2434:2011
3	Daktilitas pada 25 °C	cm	≥ 100	SNI 2432:2011
4	Berat jenis pada 25 °C	gr/cm ³	≥ 1,0	SNI 2441:2011
5	Titik nyala (Flash Point)	°C	≥ 232	SNI 2433:2011
6	Kehilangan berat setelah pemanasan (TFOT)	% berat	≤ 0,8	SNI 06-2440- 1991

Preparasi Sampel

Pada tahap ini, agregat terlebih dahulu dipanaskan hingga mencapai suhu 155°C. Selanjutnya agregat dicampurkan dengan aspal sampai dihasilkan campuran yang homogen. Campuran tersebut setelahnya ditambahkan ke cetakan dan dipadatkan menggunakan alat pemadat Marshall. Selepas proses pemadatan selesai, sampel dilakukan pendiaman dalam jangka waktu 24 jam dalam kondisi masih berada di dalam cetakan. Hal ini bertujuan agar campuran aspal dan agregat dapat mengalami proses pendinginan serta mencapai kestabilan awal sehingga bentuk sampel tetap terjaga. Setelah 24 jam, sampel kemudian dikeluarkan dari cetakan dan selanjutnya dilaksanakan perendaman dalam water bath dengan durasi 40 menit dalam suhu 60°C sebelum dijalankan tes memakai alat Marshall

Standar spesifikasi pengujian sampel menggunakan Marshall Test disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Standar Spesifikasi Parameter Marshall.

Parameter marshall	Nilai ideal / spesifikasi bina marga (AC/WC)
Stabilitas	Minimal 800 kg
Flow (kelelahan)	2 – 4 mm
VIM (Voids in Mix)	3 % – 5 %
VMA (Voids in Mineral Aggregate)	≥ 15 %
VFA (Voids Filled with Asfalt)	≥ 65 %
MQ (Masrhall Quotient)	> 250 kg/mm

Selepas dilakukan pengujian Marshall, berikutnya hendak dijalankan perhitungan terhadap parameter-parameter campuran aspal. Perhitungan tersebut meliputi nilai *Marshall Quotient* (MQ), *Void in Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), dan *Void Filled with*

Asphalt (VFA). Rumus perhitungan masing-masing parameter tersebut disajikan sebagai berikut :

$$VIM = 100 - \frac{Gmm \times Gmb}{Gm} \text{ (Teshome et al., 2025).}$$

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \text{ (Teshome et al., 2025).}$$

$$VFA = \frac{(VMA - VIM)}{VMA} \times 100 \text{ (Teshome et al., 2025).}$$

$$MQ = \frac{S}{F} \text{ (Attaelmanan et al., 2011).}$$

Keterangan:

VIM	= Rongga udara pada campuran selepas pemadatan (%)
Gmm	= Berat jenis <i>bulk</i> agregat
Gmb	= Berat jenis <i>bulk</i> campuran selepas pemadatan
VMA	= Rongga udara pada mineral agregat (%)
Gmb	= Berat jenis <i>bulk</i> campuran selepas proses pemadatan
Gsb	= Berat jenis <i>bulk</i> agregat
Ps	= Kandungan Agregat
VFA	= Rongga yang terisi aspal (%)
VIM	= Rongga udara pada campuran (%)
VMA	= Rongga udara pada mineral agregat (%)
MQ	= Nilai <i>marshall quotient</i> (kg/mm)
S	= Nilai stabilitas (kg)
F	= Nilai <i>flow</i> (mm)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum dijalankan pembuatan sampel campuran aspal, terlebih dulu dilakukan pengujian terhadap aspal murni guna menyelidiki apakah aspal yang dipakai telah mencukupi spesifikasi Aspal Pen 60/70 yang dipersyaratkan. Tes ini mempunyai tujuan guna menyelidiki bahwasanya kualitas aspal yang dipakai untuk bahan pengikat berada dalam kondisi yang sesuai dengan standar sehingga dapat digunakan dalam proses pembuatan campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). Alhasil, hasil penelitian yang diperoleh mampu lebih akurat karena material yang dipakai sudah mencukupi syarat teknis yang berlaku. Berikut hasil tes aspal pen 60/70 :

Tabel 3. Hasil Pengujian Aspal Pen 60/70.

No	Pengujian	Hasil pengujian	SNI (Persyaratan untuk aspal pen 60/70)	keterangan
1	Penetrasi	65,9 mm	SNI 06-2456-1991 (60 – 70 mm)	Memenuhi SNI
2	Daktalitas	150 cm	SNI 2432:2011 ≥ 100 cm	Memenuhi SNI
3	Titik Lembek	54 °C	SNI 2434:2011 48 – 56 °C	Memenuhi SNI
4	Titik Nyala	332 °C	SNI 2433:2011 ≥ 232 °C	Memenuhi SNI
5	Berat Jenis	1,04 gr/cm ³	SNI 2441:2011 $\geq 1,0$ gr/cm ³	Memenuhi SNI
6	Kehilangan berat setelah pemanasan	0,065 %	SNI 06-2440-1991 $\leq 0,8$ berat	Memenuhi SNI

Berdasarkan hasil tes terhadap aspal murni yang digunakan dalam penelitian, dapat diketahui bahwa seluruh parameter pengujian telah memenuhi persyaratan standar Aspal Pen 60/70. Nilai penetrasi yang didapatkan sejumlah 65,9 mm masih ditemukan pada rentang spesifikasi yaitu 60–70 mm. Nilai daktalitas sebesar 150 cm juga memenuhi persyaratan minimum yaitu ≥ 100 cm, yang memperlihatkan bahwasanya aspal mempunyai tingkatan kelenturan yang baik. Nilai titik lembek sebesar 54°C berada dalam rentang standar 48–56°C, sedangkan nilai titik nyala sebesar 332°C lebih tinggi dari batas minimum 232°C, sehingga aman terhadap proses pemanasan saat pencampuran.

Hasil pengujian diperoleh melalui tes Marshall terhadap benda uji campuran aspal yang disusun dengan variasi kadar Aspal Buton. Dalam setiap variasi kadar Aspal Buton disiapkan beberapa benda uji, setelahnya hasil tes tersebut dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai yang mewakili tiap-tiap variasi.

Tabel 4. Hasil Pengujian Marshall.

Sampel	% Aspal Buton	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	MQ (kg/mm)
1	0 %	959	3,58	4,8	16,3	70,5	268
2	0 %	940	3,30	4,8	16,3	70,5	285
3	0 %	998	3,81	4,4	16,0	72,5	262
		966	3,56	4,7	16,2	71	272
1	2 %	978	3,05	4,7	15,9	70,4	321
2	2 %	1017	3,68	4,3	15,6	72,4	276
3	2 %	1017	2,79	4,5	15,7	71,3	364
		1004	3,18	4,5	15,8	71,5	316
1	5 %	1055	2,41	3,8	14,8	74,3	438
2	5 %	1074	2,29	4,7	15,6	70	469
3	5 %	1094	2,74	4,2	15,1	72,1	399
		1074	2,48	4,2	15,1	72,1	433

Hasil tes menunjukkan bahwa seluruh variasi kadar Aspal Buton yang dipakai pada riset ini menghasilkan nilai stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient yang masih mencukupi persyaratan spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga.

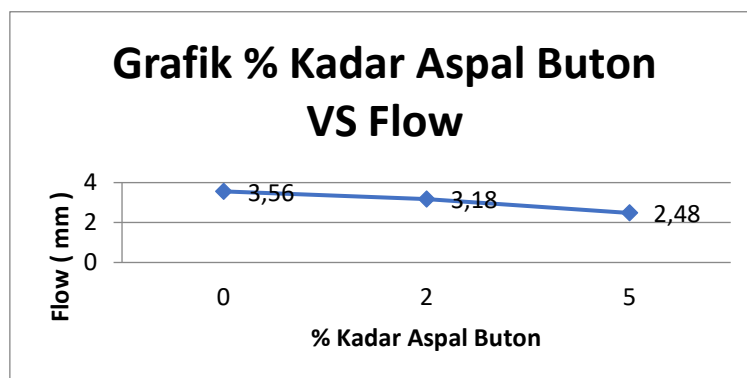
Berdasarkan hasil tes yang sudah dijalankan, diperoleh nilai stabilitas dalam setiap variasi kadar Aspal Buton. Nilai tersebut kemudian dianalisis berdasarkan nilai keakuratan dan disajikan dalam bentuk grafik korelasi antara kadar Aspal Buton terhadap stabilitas, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.



Gambar 1. Grafik Hubungan antara % Kadar Aspal Buton vs Stabilitas.

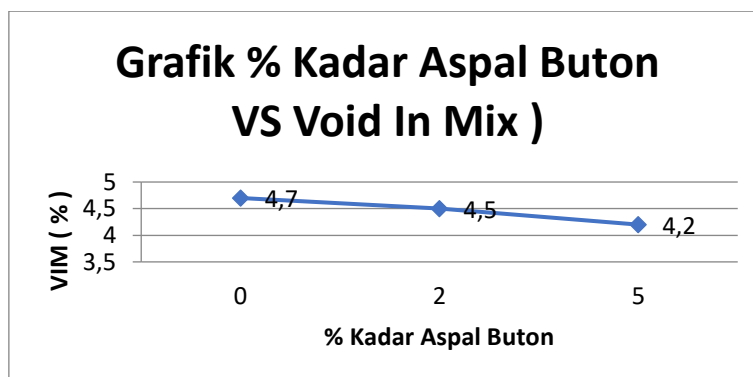
Pada gambar 2 dapat dilihat bahwasanya nilai stabilitas mengalami peningkatan sejalan terhadap bertambahnya kadar Aspal Buton pada campuran. Peningkatan nilai stabilitas ini memperlihatkan bahwasanya penambahan Aspal Buton dalam campuran dapat menguatkan ikatan antara agregat dan aspal sehingga campuran menjadi lebih sanggup menahan beban yang diberi. Makin tingginya kadar Aspal Buton yang dipakai pada campuran, alhasil nilai stabilitas campuran cenderung meningkat dan kemampuan campuran dalam menahan deformasi karena beban lalu lintas menjadi lebih baik.

Berdasarkan hasil tes yang sudah dilaksanakan, didapatkan nilai Flow pada setiap variasi kadar Aspal Buton. Nilai tersebut kemudian dianalisis berdasarkan nilai keakuratan dan disajikan dalam bentuk grafik korelasi antara kadar Aspal Buton dengan Flow, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.



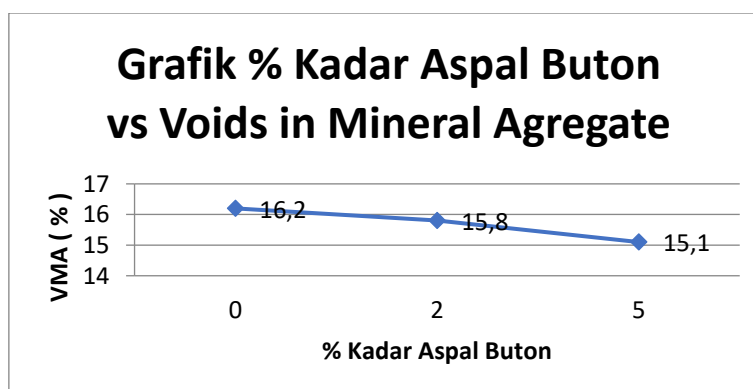
Gambar 2. Grafik Hubungan antara % Kadar Aspal Buton vs Flow.

Berdasarkan grafik hubungan kadar Aspal Buton terhadap nilai flow, dapat dilihat bahwasanya nilai flow ditemukan penyusutan sejalan terhadap meningkatnya kadar Aspal Buton dalam campuran. Penyusutan nilai flow ini menunjukkan bahwa penambahan Aspal Buton menyebabkan campuran aspal menjadi lebih kaku alhasil deformasi plastis yang ditemukan saat pembebanan menjadi lebih kecil.



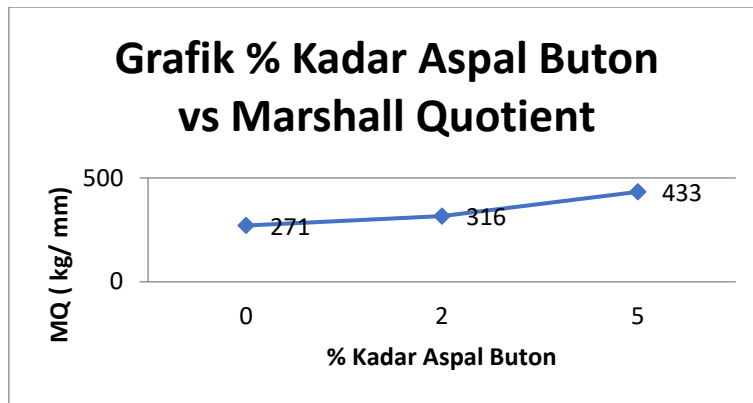
Gambar 3. Grafik Hubungan antara % Kadar Aspal Buton vs VIM.

Berdasarkan grafik korelasi kadar Aspal Buton terhadap nilai Void in Mix (VIM), dapat dilihat bahwasanya nilai VIM ditemukan penurunan sejalan terhadap pertambahan kadar Aspal Buton pada campuran. Penurunan nilai VIM ini memperlihatkan bahwasanya penambahan Aspal Buton dapat mengisi rongga udara di antara agregat alhasil campuran menjadi lebih padat serta rapat.



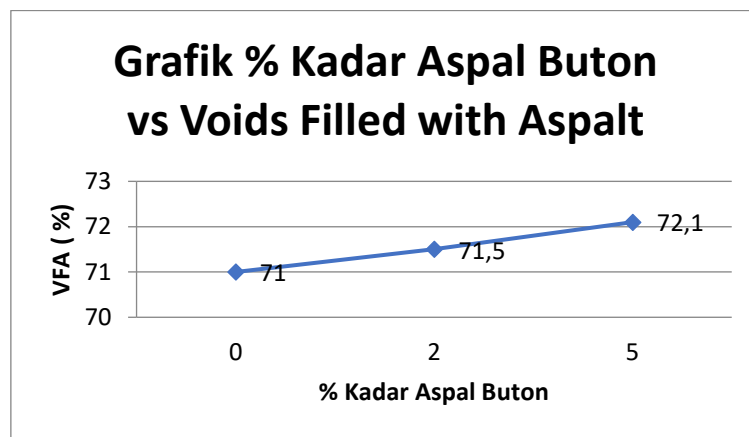
Gambar 4. Grafik Hubungan antara % Kadar Aspal Buton vs VMA.

Penurunan nilai VMA ini menunjukkan bahwasanya penambahan Aspal Buton dapat mengisi ruang kosong di antara agregat alhasil campuran menjadi lebih padat serta rapat.



Gambar 5. Grafik Hubungan antara % Kadar Aspal Buton vs MQ.

Kenaikan MQ menunjukkan bahwa aspal Buton dapat berkontribusi pada penguatan matriks aspal, meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan mekanik serta meningkatkan umur pakai infrastruktur jalan.



Gambar 6. Grafik Hubungan antara % Kadar Aspal Buton vs VFA.

Berlandaskan atas grafik hubungan kadar Aspal Buton terhadap nilai Voids Filled with Asphalt (VFA), terlihat bahwa nilai VFA mengalami kenaikan sejalan atas peningkatan kadar Aspal Buton pada campuran. Makin tingginya kadar aspal yang dipakai, makin banyaknya ruang kosong yang terisi, yang memiliki potensi menyebabkan peningkatan kekuatan serta durabilitas campuran aspal.

Berdasarkan hasil tes Marshall dalam campuran AC-WC dengan variasi kadar Aspal Buton 0%, 2%, dan 5%, dapat diketahui bahwa kadar Aspal Buton 5% memberi kinerja campuran yang paling optimal. Perihal tersebut diperlihatkan oleh nilai stabilitas tertinggi sebesar 1.074 kg yang memperlihatkan kemampuan campuran guna menahan beban lalu lintas lebih baik dibandingkan variasi yang lain. Selain itu, nilai flow sejumlah 2,48 mm masih ditemukan pada rentang spesifikasi yang disyaratkan, alhasil campuran tetap mempunyai fleksibilitas yang cukup tanpa mengalami deformasi yang berlebihan. Parameter rongga campuran seperti VIM sebesar 4,2%, VMA sejumlah 15,1%, dan VFA sejumlah 72,18% juga

masih mencukupi spesifikasi Bina Marga, yang memperlihatkan bahwasanya struktur campuran cukup padat dan memiliki durabilitas yang baik. Nilai Marshall Quotient (MQ) sejumlah 433 kg/mm yang merupakan nilai tertinggi juga menunjukkan bahwasanya campuran mempunyai tingkat kekakuan serta ketahanan deformasi yang lebih baik. Maka dari itu, mampu ditarik kesimpulan bahwasanya penambahan Aspal Buton sebesar 5% memberikan pengaruh paling optimal terhadap peningkatan karakteristik Marshall pada campuran AC-WC.

Berlandaskan atas hasil riset yang sudah dilaksanakan, penambahan Aspal Buton dalam campuran AC-WC dengan aspal penetrasi 60/70 menunjukkan adanya pengaruh terhadap sifat mekanik campuran, terutama pada parameter Marshall seperti halnya stabilitas, flow, serta Marshall Quotient (MQ). Pada kadar tertentu, terjadi peningkatan nilai stabilitas yang memperlihatkan bahwasanya campuran menjadi lebih kaku serta sanggup menahan beban lebih berat. Namun, pada kadar yang lebih tinggi, terjadi kecenderungan penurunan stabilitas akibat berkurangnya fleksibilitas campuran.

Hasil riset ini selaras terhadap riset sebelumnya yang memberi pernyataan bahwasanya penggunaan Asbuton LGA dalam campuran AC-WC dengan aspal Pen 60/70 masih mencukupi spesifikasi Bina Marga pada seluruh variasi kadar. Nilai stabilitas yang dihasilkan berada pada kisaran 1008–1109 kg dan menunjukkan bahwa penambahan Asbuton tidak menurunkan kinerja campuran secara signifikan, bahkan mampu mempertahankan kekuatan struktur campuran (Mendrofa et al., 2024).

Selain itu, penelitian oleh Dairi & Pratama (2024) juga menunjukkan bahwa penggunaan Aspal Esso yang dimodifikasi dengan Asbuton BGA menghasilkan parameter Marshall seperti stabilitas, flow, MQ, dan density yang mencukupi spesifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi aspal minyak dengan Asbuton mampu meningkatkan kinerja mekanik campuran, meskipun diperlukan kontrol terhadap nilai VIM agar tetap sesuai standar.

Riset lainnya oleh Kurnia et al. (2025) memperlihatkan bahwasanya pemakaian Asbuton BGA B 5/20 sebagai bagian dari campuran AC-WC mampu menaikkan stabilitas dan memperbaiki karakteristik Marshall. Perihal tersebut menunjukkan bahwa Asbuton berperan dalam meningkatkan kekuatan struktur campuran melalui interaksi antara bitumen dan mineral yang terkandung di dalamnya.

Selanjutnya, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa substitusi parsial aspal minyak dengan Asbuton B5/20 pada kadar rendah (2–4%) menghasilkan peningkatan kinerja mekanik campuran, terutama dalam nilai stabilitas dan Marshall Quotient. Namun, peningkatan tersebut hanya terjadi hingga kadar optimum, dimana dalam kadar yang lebih tinggi terkait menurunnya kinerja campuran (Hakzah et al., 2025).

Selain itu, studi komparatif terbaru menunjukkan bahwa penggunaan bahan tambah seperti Asbuton pada campuran AC-WC secara umum sanggup menaikkan stabilitas Marshall, dengan nilai optimum biasanya ditemukan dalam rentang 2–5% bahan tambah. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan modifikasi seperti Asbuton efektif dalam meningkatkan performa campuran aspal (Purnomo et al., 2026).

Berlandaskan atas perbandingan terhadap riset sebelumnya, mampu ditarik kesimpulan bahwasanya hasil riset ini sejalan terhadap berbagai studi sebelumnya yang menunjukkan bahwasanya penambahan Aspal Buton dalam campuran AC-WC dengan aspal penetrasi 60/70 mampu meningkatkan sifat mekanik campuran, khususnya stabilitas dan kekakuan. Namun, peningkatan tersebut hanya terjadi hingga kadar optimum tertentu, dimana dalam kadar yang terlalu besar justru menyebabkan pengurangan kinerja akibat berkurangnya fleksibilitas campuran. Alhasil, pemakaian Asbuton selaku bahan tambah atau substitusi parsial merupakan solusi yang efektif guna menaikkan kinerja perkerasan jalan, selama digunakan pada kadar yang tepat.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Variasi penggunaan aspal penetrasi 60/70 dengan penambahan aspal buton B 5/20 memberikan pengaruh terhadap nilai stabilitas Marshall pada campuran aspal AC-WC. Penambahan aspal buton cenderung meningkatkan nilai stabilitas karena kandungan bitumen alami dan mineral dalam aspal buton dapat memperkuat ikatan antar agregat alhasil campuran menjadi lebih kaku serta dapat menahan beban yang bobotnya lebih berat.

Berlandaskan atas hasil tes Marshall dengan variasi kadar aspal buton 0%, 2%, dan 5%, diperoleh bahwa campuran aspal AC-WC masih mencukupi persyaratan spesifikasi yang ditentukan. Kadar maksimum penggunaan aspal buton B 5/20 yang masih menghasilkan campuran aspal AC-WC yang baik adalah sebesar 5%, karena pada kadar tersebut nilai stabilitas dan parameter Marshall lainnya masih berada dalam batas spesifikasi yang berlaku multidisipliner. Disarankan agar riset berikutnya mampu memakai variasi kadar Aspal Buton yang lebih luas untuk memperoleh kadar optimum yang lebih akurat terhadap karakteristik campuran AC-WC serta menggunakan sumber material agregat yang berbeda guna menyelidiki dampak karakteristik agregat terhadap kinerja campuran AC-WC dengan penambahan Asbuton. Selain itu, perlu dilakukan pengujian skala lapangan untuk mengetahui performa campuran aspal yang dimodifikasi dengan Asbuton dalam kondisi lalu lintas serta lingkungan yang sebenarnya.

DAFTAR REFERENSI

- Adiwidodo, A. I., Rahman, H., & Zain, N. (2023). Analisis kinerja modulus resilien dan ketahanan fatigue campuran AC-WC dengan Asbuton murni, BNA blend, dan aspal Pen 60/70. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(3), 481–490. <https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.3.16>
- Adwang, J. (2020). Kajian perbedaan campuran beraspal panas yang menggunakan bahan agregat dengan berat jenis (*specific gravity*) yang berbeda. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 5(2), 195–207. <https://doi.org/10.33096/jtism.v5i2.90>
- Akhbar, H. T., Hadi, W., & Daryati, D. (2019). Kajian parameter Marshall dengan menggunakan limbah karet ban dalam kendaraan sebagai bahan tambah pada campuran lapis aus permukaan aspal beton (AC-WC). *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 14(2). <https://doi.org/10.21009/jmenara.v14i2.18120>
- Alfarizi, I., Hakzah, H., & Widarto, H. (2025). Optimalisasi campuran AC-BC menggunakan Asbuton B50/30 berdasarkan karakteristik Marshall. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(4), 15347–15354.
- Assiddiqie, T. M., Nurmayadi, A. R., & Nurmayadi, D. (2025). Studi penggunaan Asbuton pada campuran aspal panas asphalt concrete-wearing course (AC-WC). *JITSi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 4(2), 116–128. <https://doi.org/10.36423/jitsi.v4i2.2108>
- Attaelmanan, M., Feng, C. P., & Al, A. H. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high-density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 2764–2770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037>
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *Spesifikasi aspal keras berdasarkan kelas penetrasi*.
- Dairi, R. H., & Pratama, Y. (2024). Studi karakteristik campuran beraspal (AC-WC) menggunakan aspal Esso dengan penambahan Asbuton tipe BGA (*Buton granular asphalt*). *Jurnal Media Infrastruktur*, 13(2), 36–43. <https://doi.org/10.55340/jmi.v13i2.1772>
- Hady, M., & Yusputri, R. M. (2022). Karakteristik campuran beton aspal (AC-WC) dengan pencampuran minyak solar terhadap parameter Marshall. *Prince*, 1(1), 39–46.
- Hakzah, H., Putri, A., & Fadly, I. (2025). Evaluasi kinerja campuran AC-WC dengan substitusi parsial aspal minyak oleh Asbuton B520 kadar rendah. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 23(3), 183. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v23i3.23051>
- Insani, A., Hakzah, H., & Fadly, I. (2025). Evaluasi kinerja campuran AC-WC dengan substitusi parsial aspal minyak oleh Asbuton B 5/20 kadar rendah. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 23. <https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v23i3.23051>
- Islah, M., Setiawan, B., & Putra, A. A. (2024). Penggunaan Asbuton asphalt concrete wearing course (AC-WC) pracampur pada proyek preservasi jalan Duri–Kandis–Sp. Palas–Siak II (Pekanbaru) (*trial mix*). *Jurnal ArTSip*, 6(2), 1–8. <https://doi.org/10.31004/jestm.v3i1.95>
- Kurnia, A. O., Firdaus, F., & Febriansyah, D. (2025). Karakteristik campuran Asbuton pada lapis aus AC-WC dengan penambahan BGA B 5/20 sebagai agregat halus pada aspal pengikat 60/70. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(2), 648. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i2.897>
- Leksono, E. P., & Ardhi, M. I. (2024). Analisis asphalt concrete wearing course (AC-WC) modifikasi dengan penambahan polypropylene (PP) dan Asbuton granular. *Repository Universitas Islam Sultan Agung*.
- Mendrofa, Y. M., Waani, J. E., & Palenewen, S. C. N. (2024). Studi kinerja campuran AC-WC menggunakan Asbuton LGA dengan penambahan aspal penetrasi. *Tekno*, 22(88), 1421–1430. <https://doi.org/10.35793/jts.v22i88.56792>

- Pulungan, W., Akbar, S. J., & Maizuar. (2025). Karakteristik Marshall campuran aspal AC-WC dengan bahan tambah graphene pada ambient temperature. *Jurnal Sendi Teknik Sipil*, 2(1), 1–8.
- Purnomo, R. R. N. P., Fatmawati, L., & Thompson, M. J. (2026). Effect of AC-WC asphalt mixture variations on Marshall stability. 2(1), 27–34.
- Putra, A. D., Despa, D., & Septiana, T. (2023). Studi eksperimental perbandingan karakteristik Marshall campuran AC-WC dengan Asbuton murni full ekstraksi dan aspal Pen 60/70. *Jurnal Rekayasa Lampung*, 2(2). <https://doi.org/10.23960/jrl.v2i2.30>
- Raharja, M. R. K., Asali, F. S., & Setiadi, B. H. (2017). Uji perbandingan kualitas hotmix dengan aspal hasil sumur minyak tua secara konvensional dengan aspal Pertamina penetrasi 60/70. *E-Journal Undip*, 6.
- Rahman, A., Putra, S., Sulistyorini, R., & Herianto, D. (2022). Karakteristik uji Marshall pada campuran split mastic asphalt (SMA). *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 10(3), 465–478. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v10i3.2704>
- Rahmat, R., Devi, S. M., & Raesandi, W. (2021). Analisis perendaman aspal AC-WC di air tawar dan air laut terhadap karakteristik Marshall dengan memanfaatkan material lokal Rintik Kabupaten Paser. *Jurnal Transukma*, 3(1), 77–88. <https://doi.org/10.36277/transukma.v3i2.77>
- Reznadya, K., Budi, S., & Supriyanto, B. (2025). Pengaruh penambahan Asbuton LGA B50/30 terhadap kinerja campuran aspal beton AC-WC berdasarkan parameter Marshall dan indeks kekuatan sisa. *Jurnal Teknik Infrastruktur*, 5(2), 353–366. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.686>
- Rohma, I. W., Supriyanto, B., & Rahardjo, B. (2023). Analisis kinerja campuran perkerasan asphalt concrete-wearing course (AC-WC) menggunakan bahan tambah Asbuton B 50/30 terhadap parameter Marshall. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 21(1), 32–38. <https://doi.org/10.22219/jmts.v21i1.23836>
- Salsabilla, S., Irwansyah, A., Desembardi, F., & Sukowati, G. (2022). Pengaruh temperatur pada campuran aspal AC-WC dengan parameter Marshall test. *JIMATS: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 1, 13–18.
- Teshome, G., Geremew, A., & Fayissa, B. (2025). Rutting performance evaluation of asphalt mixture consisting of waste marble powder filler: An experimental and numerical analysis approach. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105550>
- Wenny, S. (2024). Analisis pengaruh penambahan belerang pada aspal AC-WC terhadap nilai stabilitas dan kelelahan Marshall. *Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, 2, 131–136. <https://doi.org/10.61132/konstruksi.v2i2.245>
- Yasruddin. (2024). Karakteristik campuran asphaltic concrete wearing course (AC-WC) menggunakan kombinasi bahan pengisi (*filler*). *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 9(2), 63–68. <https://doi.org/10.35793/jts.v22i88.56792>