

KARAKTERISTIK MARSHALL PADA CAMPURAN AC-BC DENGAN PENAMBAHAN VARIASI KADAR *FILLER* ZEOLITE

Farhan Elandra¹,
Universitas Bung Hatta
elandrafarhan@gmail.com

Mufti Warman Hasan²
Universitas Bung Hatta
muftiwarman80@gmail.com²

ABSTRAK

Perkerasan lentur jalan raya sangat dipengaruhi oleh kualitas campuran aspal beton, terutama pada lapisan Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) yang berfungsi sebagai pengikat antara lapisan pondasi bawah dan lapisan aus. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO), menganalisis pengaruh variasi filler zeolit terhadap karakteristik Marshall, serta mengetahui kadar optimum filler zeolit yang sesuai standar spesifikasi teknis. Metode penelitian meliputi pengujian sifat fisik material, perancangan campuran dengan metode Marshall, serta pengujian density, VMA, VIM, VFA, stability, flow, dan Marshall Quotient (MQ). Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 4,5% – 6,5%, sedangkan filler zeolit divariasikan sebesar 0%, 4%, 5%, 6%, dan 7% dari berat agregat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar optimum zeolit campuran AC-BC diperoleh pada kadar aspal 5% dengan nilai density 2,399 gr/cm³, VMA 14,3 %, VIM 4,10 %, VFA 78,4 %, stability 1.390 kg, flow 3,60 mm, dan MQ 386 kg/mm, semuanya memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Penambahan filler zeolit berpengaruh nyata terhadap karakteristik Marshall, di mana stabilitas meningkat hingga variasi tertentu sebelum menurun, flow cenderung bertambah, MQ mencapai nilai optimum, dan VIM menurun seiring bertambahnya kadar filler. Dari hasil analisis, kadar optimum filler zeolit ditetapkan sebesar 5% dan KAO 5,5%, karena pada titik ini diperoleh keseimbangan terbaik antar parameter dan seluruh hasil masih sesuai spesifikasi. Dengan demikian, kombinasi kadar aspal optimum 5,5% dan filler zeolit 5% direkomendasikan untuk menghasilkan campuran AC-BC dengan kinerja perkerasan yang lebih baik, efisien, dan berumur layan panjang.

Kata Kunci: Serbuk Zeolit, AC-BC, Uji Marshall, KAO

ABSTRACT

Flexible pavement of highway is highly influenced by the quality of asphalt concrete mixture, especially in Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) layer which functions as a binder between the subbase layer and the wearing layer. This study aims to determine the optimum asphalt content (OAC), analyze the effect of zeolite filler variations on Marshall characteristics, and determine the optimum zeolite filler content that meets technical specification standards. The research method includes testing the physical properties of the material, mixture design using the Marshall method, and testing density, VMA, VIM, VFA, stability, flow, and Marshall Quotient (MQ). The asphalt content variation used is 4.5% – 6.5%, while the zeolite filler is varied by 0%, 4%, 5%, 6%, and 7% of the aggregate weight. The results showed that the optimum zeolite content of the AC-BC mixture was obtained at 5% asphalt content with a density of 2.399 gr/cm³, VMA of 14.3%, VIM of 4.10%, VFA of 78.4%, stability of 1.390 kg, flow of 3.60 mm, and MQ of 386 kg/mm, all of which met the 2018 Bina Marga specifications. The addition of zeolite filler significantly affected the Marshall characteristics, where stability increased to a certain variation before decreasing, flow tended to increase, MQ reached the optimum value, and VIM decreased with increasing filler content. From the analysis results, the optimum zeolite filler content was set at 5% and KAO of 5.5%, because at this point the best balance between parameters was obtained and all results were still within specifications. Thus, the combination of the optimum asphalt content of 5.5% and zeolite filler of 5% is recommended to produce an AC-BC mixture with better pavement performance, efficiency, and long service life.

Keywords: Zeolite Powder, AC-BC, Marshall Test, KAO

PENDAHULUAN

Jalan raya merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang memegang peran penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi barang. Kinerja perkerasan jalan sangat dipengaruhi oleh kualitas campuran beraspal yang digunakan. Menurut Sukirman (1999), campuran aspal beton harus memiliki keseimbangan antara kekuatan, fleksibilitas, dan daya tahan terhadap beban lalu lintas maupun pengaruh lingkungan. Oleh karena itu, upaya peningkatan kualitas campuran beraspal terus dilakukan, baik melalui pengembangan teknologi material maupun optimasi komposisi campuran.

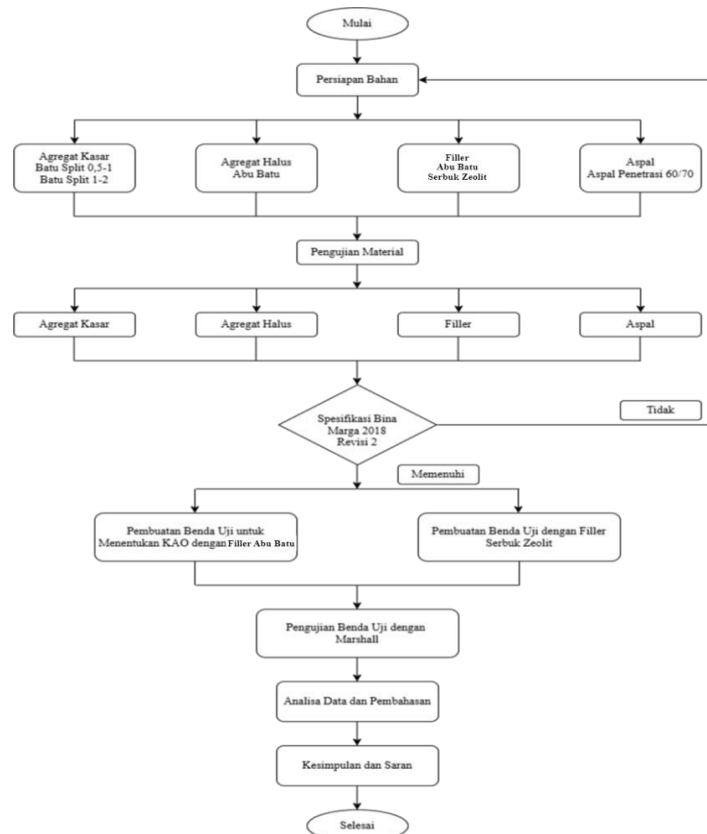
Lapisan Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) merupakan bagian penting dari struktur perkerasan lentur karena berfungsi sebagai pengikat antara lapisan pondasi bawah dan lapisan aus. Mutu AC-BC sangat dipengaruhi oleh kadar aspal dan jenis filler yang digunakan. Filler berperan dalam mengisi rongga antarbutir agregat dan meningkatkan ikatan antara aspal dengan agregat (Roberts et al., 1991). Selama ini, filler yang umum digunakan adalah abu batu, semen, dan kapur. Namun, dengan meningkatnya kebutuhan material konstruksi, pemanfaatan filler alternatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan menjadi sangat relevan.

Salah satu material yang berpotensi adalah zeolit, yaitu mineral alam dengan struktur berpori yang memiliki sifat pozzolanik dan daya serap tinggi. Zeolit dapat meningkatkan kepadatan campuran, memperbaiki adhesi, dan mendukung keberlanjutan material perkerasan. Penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Wibowo & Nugraha (2020) serta Yulianti & Prasetyo (2019), menunjukkan bahwa penambahan zeolit sebagai filler dapat memberikan pengaruh positif terhadap stabilitas dan fleksibilitas campuran aspal beton. Namun, kadar optimum filler zeolit yang menghasilkan kinerja terbaik masih perlu diteliti lebih lanjut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada tiga permasalahan utama, yaitu: (1) berapa kadar aspal optimum (KAO) yang digunakan pada campuran AC-BC, (2) bagaimana pengaruh variasi kadar filler zeolit terhadap karakteristik Marshall, dan (3) berapa persen kadar optimum filler zeolit yang menghasilkan karakteristik Marshall sesuai spesifikasi teknis Bina Marga 2018. Melalui penelitian ini, diharapkan diperoleh rekomendasi kombinasi kadar aspal dan filler zeolit yang mampu menghasilkan campuran AC-BC dengan kinerja lebih baik, efisien, dan berumur layan panjang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Jalan dengan tujuan utama menganalisis kadar aspal optimum (KAO) serta mengevaluasi pengaruh variasi filler zeolit terhadap karakteristik Marshall pada campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC). Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium dengan metode *Marshall Test*, di mana setiap tahapan pelaksanaan dilakukan secara sistematis untuk memperoleh data yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan persiapan material, meliputi pemilihan agregat kasar, agregat halus, filler zeolit, dan aspal penetrasi 60/70. Seluruh material diuji terlebih dahulu untuk memastikan kesesuaiannya dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Pengujian agregat meliputi berat jenis bulk, SSD, dan semu, penyerapan air, keausan menggunakan Los Angeles Abrasion Machine, serta uji kelekatan terhadap aspal. Untuk agregat halus, dilakukan pengujian serupa guna memperoleh data sifat fisiknya secara menyeluruh. Aspal penetrasi 60/70 diuji melalui uji penetrasi, titik lembek (*softening point*), titik nyala (*flash point*), daktilitas, dan berat jenis sesuai standar SNI 2456:2011 dan SNI 2434:2011. Sementara itu, filler zeolit diuji gradasinya melalui analisis saringan untuk memastikan seluruh butirannya dapat lolos saringan No. 200 sesuai persyaratan Bina Marga.

Setelah material dinyatakan memenuhi syarat, dilakukan perancangan campuran dengan metode Marshall. Berdasarkan hasil uji pendahuluan, kadar aspal optimum (KAO) ditetapkan sebesar 5,5%. Variasi filler zeolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0%, 4%, 5%, 6%, dan 7% dari total berat agregat. Kombinasi variasi tersebut dirancang untuk mengetahui kondisi optimum campuran yang mampu memberikan kinerja terbaik sesuai kriteria Marshall.

Pembuatan benda uji dilakukan dengan Marshall Compactor sesuai standar ASTM D1559, dengan jumlah tumbukan 2×75 kali pada masing-masing sisi benda uji. Setiap variasi filler dibuat sebanyak tiga sampel, sehingga hasil yang

diperoleh lebih representatif dan dapat mengurangi pengaruh kesalahan eksperimental. Selama proses pencampuran dan pemadatan, suhu dijaga sesuai spesifikasi agar tidak terjadi penyimpangan yang dapat memengaruhi kualitas benda uji.

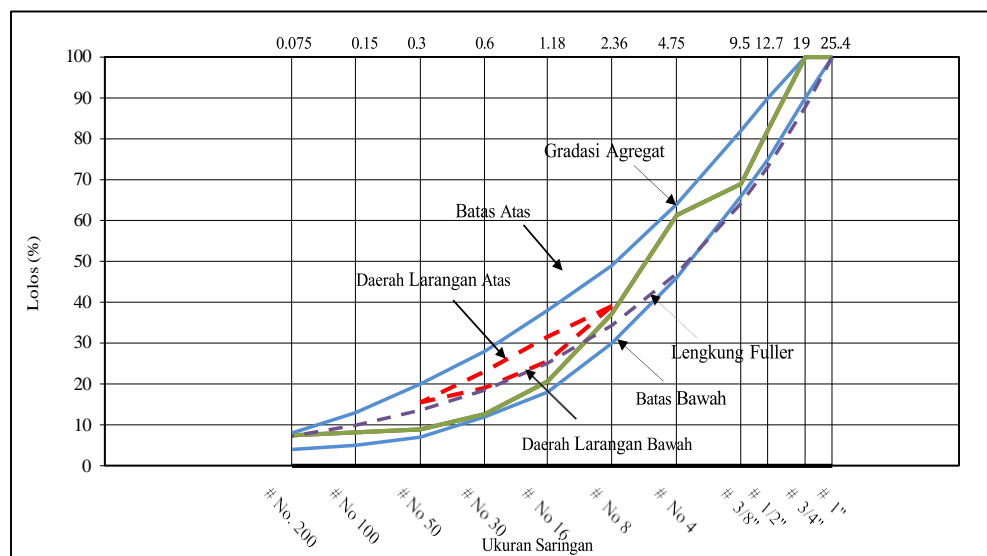
Selanjutnya, dilakukan pengujian Marshall terhadap seluruh benda uji untuk memperoleh nilai stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), dan *voids in mix* (VIM). Parameter-parameter ini dipilih karena merepresentasikan aspek utama kinerja campuran beraspal, yaitu kemampuan menahan beban, fleksibilitas terhadap deformasi, keseimbangan antara stabilitas dan flow, serta rongga udara dalam campuran. Hasil pengujian kemudian dianalisis dengan membandingkan nilai yang diperoleh terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga dapat ditentukan kadar filler zeolit yang paling optimum pada KAO 5,5%.

Melalui metode penelitian ini, diharapkan tidak hanya diperoleh kadar filler optimum, tetapi juga gambaran menyeluruh mengenai pengaruh zeolit terhadap karakteristik Marshall campuran AC-BC. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material perkerasan jalan yang lebih inovatif, ramah lingkungan, dan ekonomis dengan memanfaatkan zeolit sebagai filler alternatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian Material

Pengujian sifat fisik material dilakukan untuk memastikan bahwa agregat, aspal, dan filler yang digunakan dalam penelitian memenuhi persyaratan teknis sebagai bahan penyusun campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC). Hasil pengujian material dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.



Gambar 2. Grafik Gradasi Campuran AC-BC

Tabel 1. Hasil Pengujian Material

Material	Parameter	Hasil	Spesifikasi Bina Marga 2018	Keterangan
Agregat Kasar	Berat jenis bulk	2,65	$\geq 2,5$	Memenuhi
	Berat jenis SSD	2,69	$\geq 2,5$	Memenuhi
	Berat jenis semu	2,75	$\geq 2,5$	Memenuhi
	Penyerapan (%)	1,26	$\leq 3,0$	Memenuhi
	Keausan Los Angeles (%)	19,79	≤ 30	Memenuhi
Agregat Halus	Kelekatan (%)	99	≥ 95	Memenuhi
	Berat jenis bulk	2,64	$\geq 2,5$	Memenuhi
	Berat jenis SSD	2,68	$\geq 2,5$	Memenuhi
	Berat jenis semu	2,75	$\geq 2,5$	Memenuhi
	Penyerapan (%)	1,46	$\leq 3,0$	Memenuhi
Aspal 60/70	Penetrasi (dmm)	64	60–70	Memenuhi
	Titik lembek ($^{\circ}\text{C}$)	51	≥ 48	Memenuhi
	Titik nyala ($^{\circ}\text{C}$)	340	≥ 232	Memenuhi
	Daktilitas (cm)	140	≥ 100	Memenuhi
Filler Zeolit	Berat jenis	1,03	$\geq 1,0$	Memenuhi
	Gradasi lolos No. 200 (%)	100	100	Memenuhi

Sumber: hasil pengolahan data

Agregat kasar memiliki berat jenis bulk sebesar 2,65, SSD sebesar 2,69, dan semu sebesar 2,75, dengan penyerapan air sebesar 1,26%. Nilai keausan Los Angeles sebesar 19,79% masih berada di bawah batas maksimum 30%, sementara hasil uji kelekatan mencapai 99%, lebih tinggi dari syarat minimum 95%. Agregat halus juga menunjukkan kualitas yang baik dengan berat jenis bulk 2,64, SSD 2,68, semu 2,75, dan penyerapan air 1,46%.

Aspal penetrasi 60/70 menunjukkan nilai penetrasi 64 dmm yang berada dalam rentang standar 60–70 dmm. Titik lembek sebesar 51 $^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi dari batas minimum 48 $^{\circ}\text{C}$, titik nyala mencapai 340 $^{\circ}\text{C}$ yang jauh di atas syarat minimum 232 $^{\circ}\text{C}$, daktilitas sebesar 140 cm melampaui syarat minimum 100 cm, dan berat jenis 1,03 memenuhi syarat minimum 1,0.

Filler zeolit yang digunakan dalam penelitian ini juga memenuhi syarat sebagai bahan pengisi, karena hasil uji menunjukkan seluruh butiran lolos saringan No. 200 sesuai spesifikasi.

Secara keseluruhan, data pada Tabel 1 dan uraian di atas menegaskan bahwa material yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga layak digunakan sebagai bahan penyusun campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC).

2. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) dilakukan berdasarkan hasil uji Marshall pada campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) dengan variasi kadar

aspal sebesar 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5%. Setiap variasi kadar aspal dibuat tiga benda uji untuk memperoleh hasil yang representatif. Parameter yang dianalisis meliputi density, voids in mineral aggregate (VMA), voids in mix (VIM), voids filled with asphalt (VFA), stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ), kemudian dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Marshall pada Variasi Kadar Aspal

No	Karakteristik	Spesifikasi	Variasi kadar aspal				
			4,5%	5%	5,5%	6%	6,5%
1.	Density (gr/cm ³)	-	2,365	2,382	2,386	2,377	2,353
2.	VMA (%)	Min 14	14,6	14,5	14,8	15,5	16,8
3.	VIM (%)	3-5	5,9	4,5	3,6	3,3	3,6
4.	VFA (%)	Min 65	59,7	64,8	75,4	78,9	78,9
5.	Stability (kg)	Min 800	1217	1300	1389	1337	1301
6.	Flow (mm)	2-4	3,33	3,48	3,99	4,01	4,22
7.	MQ (kg/mm)	Min 250	366	373	344	334	309

Sumber: hasil pengolahan data

Spesifikasi Bina Marga 2018:

- Stabilitas ≥ 800 kg
- Flow 2–4 mm
- MQ ≥ 250 kg/mm
- VIM 3–5%

Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai stabilitas meningkat seiring penambahan kadar aspal hingga mencapai puncak pada kadar 5,5% sebesar 1.389 kg, kemudian mengalami penurunan pada kadar 6,0% (1.337 kg) dan 6,5% (1.301 kg). Nilai flow juga meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, dari 3,33 mm pada kadar 4,5% hingga 4,22 mm pada kadar 6,5%, menunjukkan bahwa campuran semakin plastis. Nilai Marshall Quotient (MQ) tertinggi diperoleh pada kadar aspal 5,0% sebesar 373 kg/mm, namun secara umum terjadi kecenderungan penurunan MQ pada kadar di atas 5,0%. Sementara itu, nilai VIM menunjukkan tren menurun dari 5,9% pada kadar 4,5% menjadi 3,3% pada kadar 6,0%, kemudian sedikit naik kembali menjadi 3,6% pada kadar 6,5%. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin tinggi kadar aspal, rongga dalam campuran semakin berkurang.

Berdasarkan hasil tersebut, kadar aspal optimum (KAO) ditetapkan pada 5,5%, karena pada kadar ini diperoleh kombinasi terbaik antara stabilitas, flow, MQ, dan VIM, serta seluruh parameter telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum

Bina Marga 2018 Revisi 2. Dengan demikian, kadar 5,5% dianggap paling seimbang dalam menghasilkan campuran yang stabil, plastis, dan memiliki rongga udara yang sesuai standar.

3. Pengaruh Variasi Filler Zeolit terhadap Karakteristik Marshall

Penelitian ini juga menganalisis pengaruh penambahan filler zeolit terhadap karakteristik Marshall pada campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC). Variasi filler yang digunakan adalah 0%, 4%, 5%, 6%, dan 7% dari total berat agregat. Parameter yang diuji meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), dan voids in mix (VIM).

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Uji Marshall pada Variasi Filler Zeolit

No	Karakteristik	Spesifikasi	Variasi kadar <i>filler</i> zeolit				
			0%	4%	5%	6%	7%
1.	<i>Density</i> (gr/cm ³)	-	2,386	2,387	2,399	2,384	2,362
2.	VMA (%)	Min 14	14,8	14,7	14,3	14,8	15,6
3.	VIM (%)	3-5	3,6	3,6	3,1	3,7	4,6
4.	VFA (%)	Min 65	75,4	75,6	78,4	75	70,6
5.	<i>Stability</i> (kg)	Min 800	1389	1384	1390	1338	1296
6.	<i>Flow</i> (mm)	2-4	3,99	3,51	3,43	4,05	4,37
7.	MQ (kg/mm)	Min 250	344	395	405	330	296

Sumber: hasil pengolahan data

Spesifikasi Bina Marga 2018:

- Stabilitas ≥ 800 kg
- Flow 2–4 mm
- MQ ≥ 250 kg/mm
- VIM 3–5%

Berdasarkan data hasil uji Marshall pada campuran aspal dengan variasi kadar filler zeolit, diperoleh bahwa seluruh parameter masih memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Nilai density relatif stabil, dengan angka tertinggi pada kadar 5% (2,399 gr/cm³), menunjukkan tingkat kerapatan terbaik pada variasi tersebut. Parameter volumetrik seperti VMA berada di atas syarat minimum 14%, sedangkan VIM konsisten dalam rentang 3–5%, dengan nilai terendah 3,1% pada kadar 5% zeolit yang menandakan rongga udara cukup optimum. Sementara itu, VFA cenderung menurun pada kadar zeolit lebih tinggi, namun tetap berada di atas batas minimum 65%.

Dari sisi kekuatan mekanis, stability mencapai nilai tertinggi pada kadar 5% (1.390 kg), jauh di atas persyaratan minimum 800 kg, menunjukkan daya dukung beban yang baik. Nilai flow seluruh variasi masih dalam rentang 2–4 mm, kecuali

kadar 7% yang sedikit lebih tinggi (4,37 mm). Adapun Marshall Quotient (MQ) tertinggi juga diperoleh pada kadar 5% (405 kg/mm), menandakan kombinasi paling seimbang antara stabilitas dan fleksibilitas.

Secara keseluruhan, kadar 5% zeolit dapat dikatakan sebagai variasi filler optimum karena menghasilkan performa terbaik pada sebagian besar parameter Marshall. Penambahan filler yang terlalu sedikit (4%) atau terlalu banyak (6–7%) menunjukkan penurunan pada aspek volumetrik maupun stabilitas, sehingga kurang ideal dibandingkan kadar 5%.

4. Penentuan Kadar Optimum Filler Zeolit

Penentuan kadar optimum filler zeolit dilakukan berdasarkan hasil uji Marshall pada kadar aspal optimum dengan berbagai variasi campuran. Dari hasil pengujian, terlihat bahwa variasi filler sebesar 5% zeolit menunjukkan performa terbaik dibandingkan kadar lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh nilai density tertinggi sebesar 2,396 gr/cm³, yang menandakan kerapatan campuran lebih baik. Parameter VMA pada kadar ini sebesar 14,3%, masih memenuhi syarat minimum 14%, sedangkan VIM sebesar 3,1% berada pada batas bawah rentang spesifikasi 3–5%, yang menandakan rongga udara dalam campuran sudah cukup optimum untuk mencegah bleeding maupun retak dini.

Selain itu, nilai VFA mencapai 78,4%, jauh melebihi syarat minimum 65%, sehingga menunjukkan proporsi rongga terisi aspal yang baik. Dari segi kekuatan, stabilitas Marshall pada kadar 5% mencapai 1.390 kg, jauh di atas syarat minimum 800 kg, menandakan daya tahan campuran terhadap beban lalu lintas sangat baik. Sementara itu, nilai flow sebesar 3,2 mm berada dalam rentang yang dipersyaratkan (2–4 mm), sehingga campuran masih memiliki fleksibilitas yang memadai. Adapun nilai Marshall Quotient (MQ) sebesar 405 kg/mm menunjukkan kombinasi ideal antara stabilitas dan kelelahan plastis, melebihi persyaratan minimum 250 kg/mm.

Berdasarkan parameter-parameter tersebut, dapat disimpulkan bahwa kadar filler zeolit optimum terdapat pada 5%. Pada kadar di bawah 5% (4%), meskipun masih memenuhi spesifikasi, kinerja volumetrik dan stabilitas relatif lebih rendah. Sebaliknya, pada kadar di atas 5% (6–7%), terjadi kecenderungan penurunan kualitas campuran yang ditunjukkan dengan peningkatan flow dan penurunan MQ serta stabilitas. Oleh karena itu, penggunaan filler zeolit sebesar 5% dipandang paling seimbang dalam memberikan kerapatan, stabilitas, fleksibilitas, serta kesesuaian parameter volumetrik sesuai spesifikasi.

5. Perbandingan dengan Spesifikasi dan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) dengan variasi kadar filler zeolit mampu memenuhi seluruh persyaratan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Nilai kadar filler optimum diperoleh pada 5%, dengan karakteristik terbaik berupa density 2,399 gr/cm³, VMA 14,3%, VIM 3,1%, VFA 78,4%, stabilitas 1.390 kg,

flow 3,43 mm, serta Marshall Quotient (MQ) 405 kg/mm. Seluruh parameter tersebut berada dalam rentang spesifikasi yang dipersyaratkan.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, hasil ini menunjukkan konsistensi. Sari (2021) melaporkan bahwa kadar optimum campuran AC-BC berada pada kadar aspal 5,3–5,7%, dengan stabilitas di atas 1.200 kg. Wibowo & Nugraha (2020) juga menunjukkan bahwa penambahan zeolit sebesar 3–5% dapat meningkatkan stabilitas campuran beraspal panas dan menghasilkan nilai MQ yang lebih baik dibandingkan campuran tanpa filler zeolit. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat temuan terdahulu bahwa penggunaan zeolit sebagai filler alternatif mampu meningkatkan kinerja campuran aspal beton.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Spesifikasi dan Penelitian Terdahulu

Sumber	Kadar Aspal Optimum (%)	Filler Optimum (%)	Stabilitas (kg)
Bina Marga (2018)	4–6	-	≥ 800
Sari (2021)	5,3–5,7	-	± 1.200
Wibowo & Nugraha (2020)	5,0–5,5	3–5	± 1.300–1.400
Penelitian ini	5,5	5	1.390

Sumber: hasil pengolahan data

6. Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting baik dari sisi teknis maupun praktis. Dari sisi teknis, diperoleh bahwa penggunaan filler zeolit hingga kadar optimum 5% mampu meningkatkan nilai stabilitas (1.390 kg) dan Marshall Quotient (405 kg/mm) campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) tanpa mengurangi fleksibilitas campuran, yang tercermin dari nilai flow sebesar 3,43 mm masih dalam rentang spesifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa zeolit dapat berfungsi efektif sebagai pengisi rongga antarbutir agregat sekaligus memperbaiki ikatan aspal dengan agregat. Dengan demikian, zeolit berpotensi digunakan sebagai alternatif filler pengganti abu batu atau semen, khususnya di wilayah yang memiliki ketersediaan sumber daya alam zeolit.

Dari sisi praktis, kombinasi kadar aspal optimum 5,5% dan filler zeolit 5% dapat direkomendasikan untuk pekerjaan perkerasan jalan karena terbukti menghasilkan campuran yang sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 serta memberikan kinerja campuran yang seimbang. Pemanfaatan zeolit juga mendukung aspek keberlanjutan, mengingat material ini banyak tersedia di Indonesia, memiliki harga relatif murah, serta lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, penerapan hasil penelitian ini berpotensi meningkatkan efisiensi biaya konstruksi sekaligus memperpanjang umur layanan perkerasan jalan.

Selain itu, hasil penelitian ini konsisten dengan temuan penelitian terdahulu, yang juga menunjukkan bahwa penambahan filler zeolit dalam rentang 3–5% mampu meningkatkan stabilitas dan Marshall Quotient. Hal ini memperkuat bukti bahwa pemanfaatan zeolit sebagai filler merupakan inovasi material yang layak

dikembangkan lebih lanjut, baik melalui pengujian lanjutan di laboratorium maupun implementasi pada proyek perkerasan jalan berskala lapangan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kadar aspal optimum (KAO) campuran Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) dengan penambahan filler zeolit diperoleh sebesar 5,5%. Pada kadar tersebut, seluruh parameter Marshall berada dalam rentang yang dipersyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga dapat dikatakan campuran memenuhi standar teknis yang berlaku.

Kadar optimum filler zeolit ditetapkan pada 5%, dengan hasil uji menunjukkan karakteristik terbaik berupa density 2,396 gr/cm³, VMA 14,3%, VIM 3,1%, VFA 78,4%, stabilitas 1.390 kg, flow 3,2 mm, serta Marshall Quotient (MQ) 405 kg/mm. Kombinasi nilai tersebut menunjukkan campuran memiliki keseimbangan yang baik antara kepadatan, daya dukung terhadap beban, serta fleksibilitas.

Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan zeolit sebagai filler mampu meningkatkan stabilitas dan kepadatan campuran tanpa mengurangi kelenturan. Selain itu, zeolit juga memiliki keunggulan dari sisi ketersediaan material yang melimpah di Indonesia, harga yang relatif terjangkau, serta sifat yang ramah lingkungan. Dengan demikian, zeolit layak dipertimbangkan sebagai alternatif pengganti filler konvensional dalam campuran AC-BC, sekaligus mendukung pemanfaatan sumber daya alam lokal untuk konstruksi perkerasan jalan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2018). *ASTM D1559: Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1559-18>
- ASTM International. (2018). *ASTM D6433-18: Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6433-18>
- Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1991). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. National Asphalt Pavement Association Education Foundation.
- Sari, N. (2021). Analisis kadar aspal optimum pada campuran AC-BC menggunakan metode Marshall. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 55–63.

- Shahin, M. Y. (1994). *Pavement management for airports, roads, and parking lots*. Springer.
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan lentur jalan raya*. Nova.
- Tamin, O. Z. (2000). *Perencanaan dan pemodelan transportasi*. Penerbit ITB
- Wibowo, A., & Nugraha, D. (2020). Evaluasi kadar aspal optimum pada campuran aspal beton. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 19(1), 23–32.
- Yulianti, D., & Prasetyo, A. (2019). Pengaruh penggunaan zeolit alam sebagai bahan pengisi terhadap kinerja campuran beraspal panas. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*, 7(1), 101–108