

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

PENGARUH PENAMBAHAN KALSIUM KARBONAT SEBAGAI FILLER PADA CAMPURAN AC-WC

Aji Rahman Susilo¹, Eti Sulandari¹, Siti Mayuni^{1*}

^{1*)} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tanjungpura, Pontianak
Email Penulis Korespondensi : d1011211048@student.untan.ac.id
Nomor HP Penulis Korespondensi : 085349855740

ABSTRACT

Mineral filler contributes significantly to the performance of asphalt mixtures by filling small voids and interacting with fine aggregate and asphalt binder to form asphalt mortar. Although stone dust is widely used for this purpose, variations in its availability and quality have encouraged the consideration of alternative filler materials, including calcium carbonate (CaCO_3). This study examines the use of CaCO_3 as a partial substitute for stone-dust filler in Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) mixtures. The study aims to determine the most effective CaCO_3 substitution proportion and evaluate the optimum asphalt content (OAC) of the mixtures. Marshall testing was conducted on mixtures containing 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% CaCO_3 replacement. Material characterization demonstrated that Shell 60/70 penetration-grade asphalt, coarse and fine aggregates, stone dust, and CaCO_3 complied with the applicable SNI requirements and were therefore considered suitable for incorporation into AC-WC mixtures. Based on an overall comparison of the Marshall parameters across all tested variations, the mixture containing 75% CaCO_3 exhibited the most favorable performance at an asphalt content of 6.0%. At this asphalt content, the mixture recorded a stability value of 1,209.05 kg, a flow value of 3.26 mm, a Marshall Quotient of 377.65 kg/mm, a VIM of 3.41%, and a VFB of 82.92%. In the mixture containing 75% CaCO_3 , increasing the asphalt content from 4.5% to 6.5% reduced the VIM from 5.37% to 3.03% and increased the VFB from 69.21% to 85.98%. These changes indicate that a greater proportion of voids was filled with asphalt, resulting in a denser mixture. However, complete replacement of stone-dust filler with CaCO_3 did not provide a substantial advantage over the 75% replacement level. Therefore, a 75% CaCO_3 substitution was identified as the most effective proportion among the tested variations and has potential as an alternative filler for AC-WC mixtures.

Keyword: AC-WC, CaCO_3 , Filler, Marshall, OAC.

1. PENDAHULUAN

Sebagai prasarana transportasi, jalan berperan signifikan dalam mendukung kelancaran mobilitas masyarakat serta distribusi barang dan jasa. Peningkatan intensitas lalu lintas menuntut tersedianya struktur perkerasan yang mampu mempertahankan kinerja layanan selama umur rencana. Penurunan mutu perkerasan dapat berdampak pada berkurangnya kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan, sekaligus meningkatkan biaya pemeliharaan infrastruktur.

Perkerasan lentur berbasis aspal masih banyak digunakan karena dalam menahan beban lalu lintas serta mengakomodasi berbagai pengaruh lingkungan. Namun, kinerja perkerasan lentur sangat dipengaruhi oleh karakteristik campuran, terutama kualitas agregat, aspal, dan struktur campuran dalam menahan deformasi akibat beban berulang. Deformasi permanen atau rutting menjadi salah satu bentuk kerusakan utama yang perlu diperhatikan karena berkaitan langsung dengan penurunan stabilitas dan kenyamanan layanan jalan [1].

Dengan demikian, pengendalian terhadap pemilihan agregat, gradasi campuran, kadar aspal, serta bahan pengisi (filler) sangat diperlukan untuk memperoleh campuran aspal yang memiliki stabilitas baik, tahan terhadap deformasi, dan mampu mempertahankan kinerja perkerasan selama umur rencana. Temuan penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa karakteristik agregat memiliki peran penting terhadap kecenderungan terjadinya Kerusakan berupa alur permanen pada campuran Split Mastic Asphalt halus [2].

Pada lapis aus (Wearing Course), tuntutan kinerja campuran menjadi lebih tinggi karena lapisan ini menerima beban kontak roda secara langsung dan terpapar kondisi cuaca secara intensif. Salah satu elemen penting dalam pembentukan struktur campuran adalah filler, yaitu bahan pengisi rongga yang berperan sebagai pengikat mikro bersama aspal dan agregat halus. Bahan pengisi yang lazim digunakan adalah abu batu, tetapi ketersediaannya, variasi mutu, dan biaya produksi membuka peluang penggunaan filler alternatif yang tetap memenuhi persyaratan teknis. Dalam penelitian ini, bahan alternatif yang digunakan sebagai substitusi filler abu batu adalah CaCO_3 komersial. Material tersebut dipilih karena ukuran partikelnya yang halus berpotensi membantu mengisi rongga di antara butiran agregat dan memengaruhi karakteristik campuran aspal beton pada lapisan aus.[3].

Beberapa studi empiris telah meneliti pengaruh penggantian filler terhadap sifat campuran aspal. Penelitian oleh Dayanti et al. menunjukkan bahwa pemanfaatan abu batu kapur sebagai bahan pengisi dalam campuran AC-WC dengan berbagai variasi kadar filler mampu menghasilkan parameter Marshall yang memenuhi persyaratan sebagaimana ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 [3]. Sementara itu, Maranatha et al. Kapur tohor, kapur padam, dan kapur karbonat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi dalam campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC), dengan karakteristik campuran dievaluasi melalui pengujian Marshall, dan menemukan bahwa kapur karbonat menunjukkan performa yang sebanding atau lebih baik dibanding filler tradisional [4]. Selain itu, pengaruh variasi filler kalsium karbonat pada campuran aspal porus juga telah diteliti menggunakan uji Marshall, yang memperlihatkan respons campuran berbeda dibanding filler konvensional [5]. Penelitian Mulansari dan Risdianto mengungkapkan bahwa substitusi filler CaCO_3 pada campuran AC-WC berdampak pada nilai stabilitas dan kelelahan (flow) yang diukur melalui uji Marshall [6].

Meskipun sejumlah penelitian telah membahas penggunaan material berbasis kalsium karbonat sebagai filler campuran aspal, kajian yang secara khusus mengevaluasi CaCO_3 komersial sebagai substitusi filler abu batu pada campuran AC-WC melalui kombinasi variasi tingkat substitusi dan kadar aspal seperti yang diterapkan dalam penelitian ini masih terbatas. Penelitian ini menggunakan tingkat substitusi CaCO_3 sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dengan memvariasikan kadar aspal untuk menentukan kadar aspal optimum serta komposisi substitusi yang menghasilkan karakteristik campuran paling optimal. Evaluasi dilakukan terhadap parameter Marshall dan volumetrik secara bersamaan, meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient, VIM, VMA, dan VFB. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan evaluasi yang lebih komprehensif mengenai pemanfaatan CaCO_3 komersial sebagai substitusi filler abu batu pada campuran AC-WC dengan material agregat lokal dari quarry Peniraman, Kalimantan Barat.

2. METODE

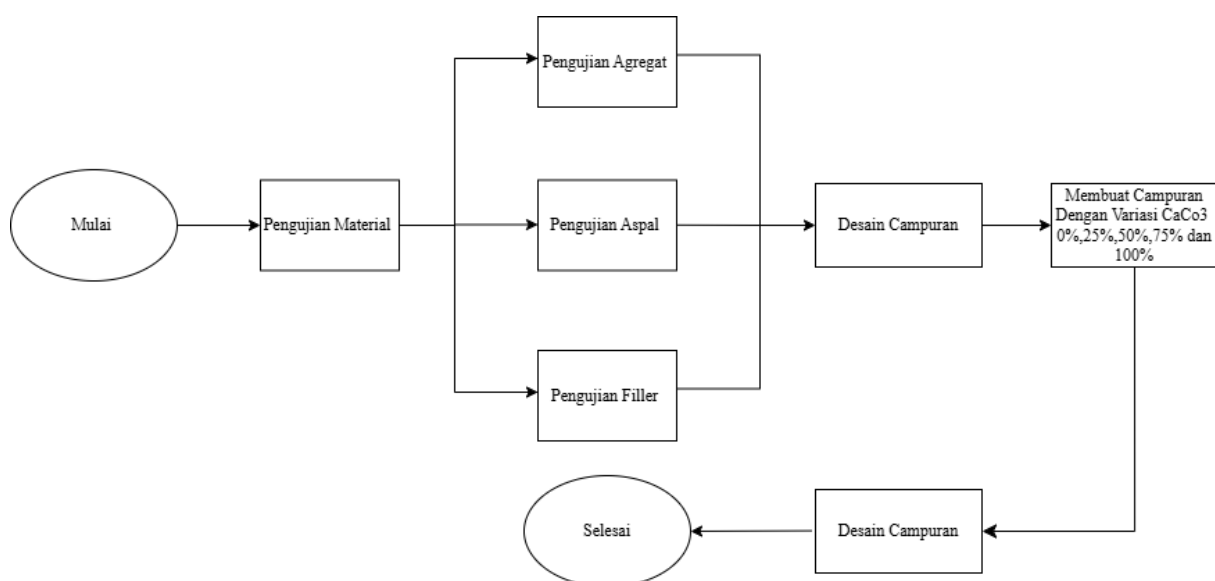
Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental [7] yang dilaksanakan dengan berpedoman pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 [11]. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura. Agregat kasar, agregat halus, dan abu batu diperoleh dari quarry Peniraman, Kalimantan Barat, sedangkan bahan pengikat yang digunakan adalah aspal Shell penetrasi 60/70. Komposisi campuran terdiri atas 25% batu pecah ukuran 1/1, 32% batu pecah ukuran 0,5, 38% abu batu, dan 5% filler berdasarkan berat total agregat. Filler pada campuran kontrol menggunakan abu batu, kemudian disubstitusi dengan CaCO_3 sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% berdasarkan berat total filler. CaCO_3 yang digunakan berupa serbuk kalsium karbonat komersial yang diperoleh dan lolos saringan No. 200. Komposisi kimia dan tingkat kemurnian CaCO_3 tidak diuji, sehingga identifikasi material mengacu pada informasi produk, sedangkan pemeriksaan dalam penelitian terbatas pada karakteristik fisik yang berkaitan dengan penggunaannya sebagai filler.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pada setiap variasi substitusi dibuat Penelitian ini menggunakan 15 benda uji yang terbagi ke dalam lima variasi kadar aspal, yaitu 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5% Masing-masing kadar aspal terdiri atas tiga benda uji. Total benda uji Marshall berjumlah 75 buah. Proses pemadatan dilakukan sebanyak 75 tumbukan untuk setiap sisi benda uji. Evaluasi dilakukan terhadap Parameter Marshall. Penentuan kadar aspal optimum dilakukan dengan mempertimbangkan kadar aspal yang telah memenuhi ketentuan karakteristik Marshall dan volumetrik menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 [11]. Dari kadar yang memenuhi persyaratan tersebut, dipilih kadar aspal yang menunjukkan kinerja campuran paling optimal..

2.1. Alur Penelitian



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Proses penelitian diawali dengan pengujian material untuk memastikan agregat, filler CaCO_3 , dan aspal memenuhi persyaratan teknis, seperti gradasi agregat, berat jenis, penyerapan, keausan agregat, serta karakteristik aspal sebagai bahan pengikat [8]. Setelah seluruh material memenuhi persyaratan kelayakan, perancangan campuran dilakukan dengan metode Marshall untuk menentukan komposisi AC-WC yang sesuai dengan ketentuan stabilitas, flow, serta parameter volumetrik [9]. Campuran kemudian dibuat dengan variasi kadar CaCO_3 sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%, lalu benda uji dipersiapkan melalui penimbangan, pemanasan, pencampuran, pemadatan, dan perendaman sebelum dilakukan pengujian Marshall [10]. Data hasil pengujian dianalisis berdasarkan parameter Marshall untuk menilai kesesuaian campuran terhadap Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 [11]. Pengujian karakteristik volumetrik perlu dilakukan karena perubahan proporsi bahan penyusun dapat memengaruhi nilai rongga udara, rongga di antara butiran agregat, rongga yang terisi aspal, dan kinerja campuran AC-WC secara keseluruhan [12]. Hasil analisis tersebut digunakan untuk menentukan campuran terbaik sebagai dasar penarikan kesimpulan dan saran penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Karakteristik Bahan

Pengujian Aspal

Mengacu pada hasil pengujian yang disajikan dalam Tabel 1, aspal yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi seluruh persyaratan spesifikasi nasional. Nilai penetrasi pada suhu 25°C diperoleh sebesar 66,80 atau masih berada dalam rentang 60–70, sehingga menunjukkan bahwa aspal memiliki tingkat kekerasan yang sesuai untuk digunakan dalam campuran beraspal dan pengujian Marshall. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai titik lembek aspal mencapai $52,30^\circ\text{C}$, sehingga telah memenuhi persyaratan minimum sebesar 48°C . Nilai tersebut menandakan bahwa aspal memiliki ketahanan yang memadai terhadap paparan suhu tinggi selama proses pencampuran, pemadatan, dan pengujian di laboratorium.

Nilai titik nyala yang diperoleh sebesar 270°C telah melampaui ketentuan minimum 200°C . Hal ini menunjukkan bahwa aspal memiliki tingkat ketahanan yang memadai terhadap paparan suhu tinggi selama proses pemanasan. Hasil pengujian berat jenis sebesar 1,067 juga telah memenuhi syarat karena berada di atas batas minimum 1, sehingga aspal tersebut memiliki kerapatan yang sesuai untuk digunakan sebagai bahan pengikat campuran. Selanjutnya, hasil pengujian daktilitas mencapai 113,5 cm dan telah memenuhi persyaratan minimum sebesar 100 cm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa aspal mempunyai fleksibilitas yang memadai sehingga mampu mengalami pemanjangan atau deformasi tanpa mudah mengalami keretakan. Adapun nilai kehilangan berat sebesar 0,063% masih jauh lebih rendah dibandingkan batas maksimum 0,8%, sehingga menunjukkan bahwa aspal relatif stabil dan tidak mudah mengalami kerusakan akibat pemanasan. Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, aspal dapat memenuhi kriteria teknis yang ditetapkan dan dinilai layak sebagai bahan pengikat pada perencanaan campuran aspal dengan metode Marshall.

Tabel 1. Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Spesifikasi Min	Spesifikasi Maks	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60	70	66,8	Memenuhi
2	Berat Jenis Aspal	SNI 2441:2011	1	-	1,067	Memenuhi
3	Titik Lembek	SNI 2434:2011	48	-	52,3	Memenuhi
4	Titik Nyala	SNI 2433:2011	232	-	270	Memenuhi
5	Titik Bakar	SNI 2433:2011	232	-	310	Memenuhi
6	Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	100	-	113,5	Memenuhi
7	Kehilangan Berat (%)	SNI 06-2440-1991	-	0,8	0,063	Memenuhi

Karakteristik aspal tersebut berperan penting dalam memengaruhi nilai stabilitas dan flow campuran. Nilai penetrasi dan titik lembek berkaitan dengan tingkat kekakuan aspal, sehingga memengaruhi kemampuan campuran dalam menahan beban sebelum mengalami deformasi. Aspal yang terlalu lunak dapat menghasilkan flow yang tinggi dan menurunkan stabilitas, sedangkan aspal yang terlalu keras dapat menyebabkan flow terlalu rendah serta meningkatkan risiko campuran menjadi getas. Sementara itu, daktilitas yang memenuhi persyaratan menunjukkan kemampuan aspal untuk mengalami regangan, sehingga campuran tetap memiliki kelenturan yang memadai. Dengan demikian, karakteristik aspal penetrasi 60/70 yang memenuhi spesifikasi mendukung tercapainya keseimbangan antara stabilitas dan flow pada campuran AC-WC, meskipun nilai Kedua parameter tersebut turut dipengaruhi oleh distribusi gradasi agregat, proporsi aspal dan filler, serta tingkat kepadatan campuran.

1) Pengujian Agregat

Pemeriksaan agregat bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen pembentuk Material penyusun campuran aspal yang terdiri atas agregat kasar, agregat halus, dan filler kalsium karbonat telah memenuhi seluruh persyaratan teknis yang ditetapkan. Pengujian keausan agregat kasar dengan metode Los Angeles yang mengacu pada SNI 2417:2008 menghasilkan persentase kehilangan material sebesar 18,08%, sehingga dinyatakan memenuhi spesifikasi karena tidak melebihi batas maksimum 40%. Sementara itu, berat jenis agregat kasar yang diuji berdasarkan SNI 1969:2016 menghasilkan nilai 2,694, lebih besar dari batas minimum $\geq 2,5$. Pengujian analisis saringan berdasarkan SNI ASTM C136:2012 juga telah dilakukan untuk menilai kesesuaian distribusi gradasi agregat dengan persyaratan spesifikasi yang digunakan

Pada agregat halus, hasil pengujian berat jenis dan penyerapan berdasarkan SNI 1970:2016 menunjukkan nilai sebesar 2,604, sehingga memenuhi persyaratan minimum $\geq 2,5$. Pengujian analisa saringan berdasarkan SNI ASTM C136:2012 dilakukan untuk mengevaluasi distribusi ukuran butiran agregat halus. Sementara itu, hasil pengujian sand equivalent berdasarkan SNI 03-4428:1997 memperoleh nilai sebesar 90,20 %, lebih tinggi dari batas minimum 50 %. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa agregat halus memiliki tingkat kebersihan yang memadai serta kandungan bahan pengotor yang relatif rendah. Kalsium karbonat yang berfungsi sebagai bahan pengisi menunjukkan hasil pengujian yang sesuai dengan standar yang ditetapkan. Pemeriksaan berat jenis serta penyerapan air dilaksanakan berdasarkan prosedur SNI 1970:2016, diperoleh nilai 2,68. Nilai ini telah melampaui ketentuan minimum sebesar 2,5. Sementara itu, hasil pengujian gradasi menggunakan metode SNI ASTM C136:2012 menunjukkan bahwa sebanyak 99% material lolos saringan No. 200. Persentase tersebut lebih tinggi dibandingkan syarat minimum 75%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, kalsium karbonat memiliki ukuran butir yang cukup halus sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material pengisi dalam campuran beraspal.

Mengacu pada hasil pengujian yang telah dilakukan, agregat kasar, agregat halus, serta kalsium karbonat menunjukkan kesesuaian terhadap persyaratan teknis yang berlaku. Dengan demikian, material yang digunakan dinyatakan layak sebagai bahan penyusun campuran aspal dan dapat mendukung keandalan hasil pengujian campuran pada tahap berikutnya.

Tabel 2. Pengujian Agregat

No	Uraian	Spesifikasi AC-WC	Hasil Pengujian	Ket
1	Berat Jenis CA			
	Berat Jenis Bulk (gr/cm ³)	min. 2,5	2,69	Memenuhi
	Berat Jenis SSD (gr/cm ³)	min. 2,5	2,71	Memenuhi
	Berat Jenis App (gr/cm ³)	min. 2,5	2,73	Memenuhi
	Penyerapan (%)	maks. 3,0	0,5	Memenuhi
2	Berat Jenis MA			
	Berat Jenis Bulk (gr/cm ³)	min. 2,5	2,65	Memenuhi
	Berat Jenis SSD (gr/cm ³)	min. 2,5	2,67	Memenuhi

No	Uraian	Spesifikasi AC-WC	Hasil Pengujian	Ket
	Berat Jenis App (gr/cm ³)	min. 2,5	2,7	Memenuhi
	Penyerapan (%)	maks. 3,0	0,72	Memenuhi
3	Berat Jenis Abu Batu			
	Berat Jenis Bulk (gr/cm ³)	min. 2,5	2,69	Memenuhi
	Berat Jenis SSD (gr/cm ³)	min. 2,5	2,73	Memenuhi
	Berat Jenis App (gr/cm ³)	min. 2,5	2,76	Memenuhi
	Penyerapan (%)	maks. 3,0	0,57	Memenuhi
4	Berat Jenis Kalsium Karbonat			
	Berat Jenis Bulk (gr/cm ³)	min. 2,5	2,7	Memenuhi
	Berat Jenis SSD (gr/cm ³)	min. 2,5	2,73	Memenuhi
	Berat Jenis App (gr/cm ³)	min. 2,5	2,7	Memenuhi
5	Analisa Saringan			
	Analisa Saringan	Min. 75% maksimum No. 200	96%	Memenuhi
6	Sand Equivalent (SE)			
	Abu Batu (%)	min. 50	70,3	Memenuhi
7	Pemeriksaan Keausan			
	Agregat Kasar	maks. 40%	18,63%	Memenuhi

3.2 Perencanaan Campuran Aspal

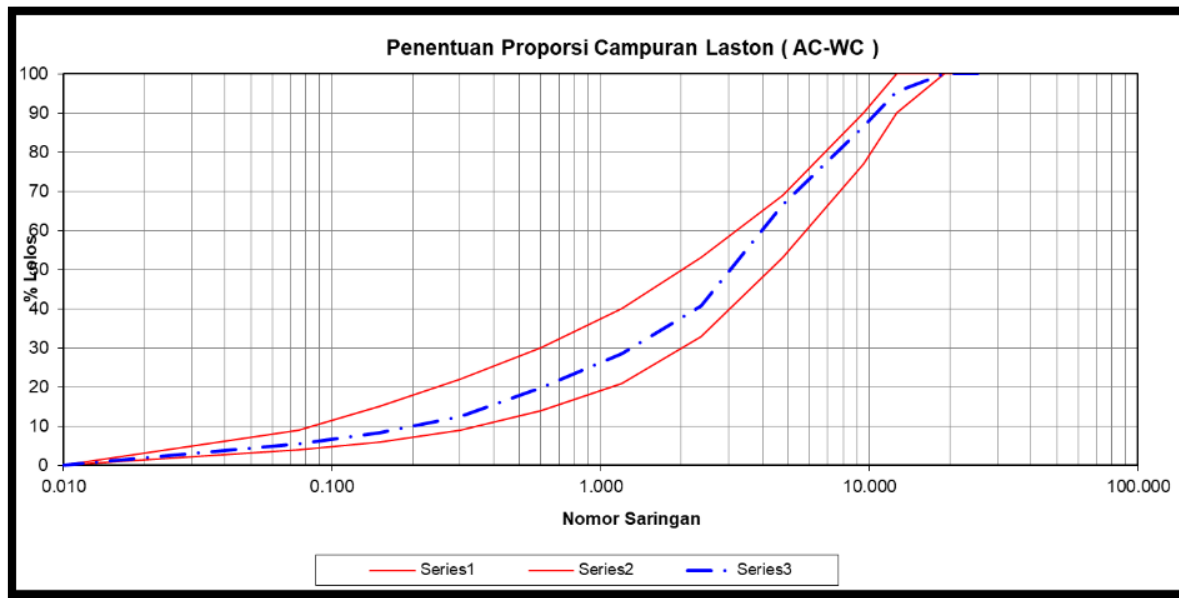
Pada tahap desain campuran perkerasan AC-WC, persentase setiap jenis agregat harus dirumuskan secara tepat sehingga susunan gradasi hasil penggabungannya berada dalam batas ketentuan yang ditetapkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 [11]. Proporsi masing-masing fraksi agregat ditentukan secara bertahap melalui serangkaian percobaan dan penyesuaian berulang. Proses tersebut dilakukan dengan mengombinasikan fraksi agregat kasar, agregat sedang, agregat halus, dan filler hingga diperoleh susunan material yang sesuai dengan gradasi rencana. Sebelum komposisi campuran ditetapkan, setiap fraksi agregat diperiksa melalui analisis saringan untuk mengidentifikasi persebaran ukuran butirnya. Data yang diperoleh kemudian dijadikan acuan dalam menyusun proporsi masing-masing material sampai gradasi hasil penggabungan memenuhi batas yang dipersyaratkan untuk campuran AC-WC.

Nilai perkiraan kadar aspal awal diperoleh melalui pendekatan empiris dengan memasukkan proporsi dari setiap fraksi agregat sebagai dasar perhitungan. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya dijadikan dasar dalam menentukan variasi kadar aspal untuk pembuatan benda uji Marshall [13]. Selanjutnya, Penetapan kadar aspal optimum dilakukan melalui evaluasi hasil uji Marshall berdasarkan parameter, yaitu stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFB [14]. Nilai kadar aspal optimum yang diperoleh digunakan sebagai dasar perancangan campuran pada tahap pengujian berikutnya serta sebagai rujukan dalam pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Tabel 3 . Persentase Gradasi Gabungan Untuk Campuran AC-WC

Gradasi Gabungan	Spesifikasi
100,026	
100	100
100	100
96,44	90–100
86,62	77–90
66,38	53–69

Gradasi Gabungan	Spesifikasi
40,63	33–53
28,63	21–40
19,86	14–30
12,41	9–22
8,28	6–15
5,32	4–9



Gambar 2. Gradasi Gabungan Untuk Campuran AC-WC

Berdasarkan Gambar 2, susunan agregat pada campuran AC-WC telah dirancang sesuai dengan komposisi material yang memenuhi persyaratan teknis Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan.

3.2.1 Kadar Aspal Rencana

Berdasarkan hasil estimasi awal kadar aspal atau nilai P_b , diperoleh nilai sebesar 5,5% dari berat total campuran. Nilai tersebut belum dapat dinyatakan sebagai kadar aspal optimum karena hanya digunakan sebagai nilai tengah dalam penentuan variasi kadar aspal yang diterapkan dalam pembuatan benda uji Marshall. Variasi kadar aspal ditentukan dengan interval sebesar 0,5%, yaitu 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5%. Setiap variasi kadar aspal kemudian diuji untuk mengevaluasi dampak perubahan kandungan aspal terhadap parameter Marshall dan karakteristik volumetrik campuran. Kadar aspal optimum (KAO) ditetapkan berdasarkan rentang kadar aspal yang mampu memenuhi seluruh kriteria karakteristik Marshall serta persyaratan volumetrik campuran, yang meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), void in mix (VIM), void in mineral aggregate (VMA), dan void filled with bitumen (VFB), sesuai dengan spesifikasi teknis yang digunakan.

3.3 Hasil dan Analisis Pengujian Marshall

Pengujian Marshall bertujuan menilai sifat kinerja campuran AC-WC yang diisi kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai filler pada kadar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pelaksanaan pengujian mengacu pada SNI 06-2489-1991 untuk memperoleh beberapa parameter utama, yaitu stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient (MQ). Data hasil pengujian kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, lalu dianalisis berdasarkan spesifikasi teknis yang berlaku guna mengetahui pengaruh variasi kadar CaCO_3 terhadap sifat campuran.

Material pengikat yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal Shell dengan tingkat penetrasi 60/70. Aspal tersebut telah memenuhi persyaratan teknis sebagai bahan pengikat pada konstruksi perkerasan lentur. Karakteristik utama aspal, termasuk nilai penetrasi dan berat jenis sebesar 1,067 gr/cm³, dijadikan acuan dalam menentukan proporsi campuran agregat.

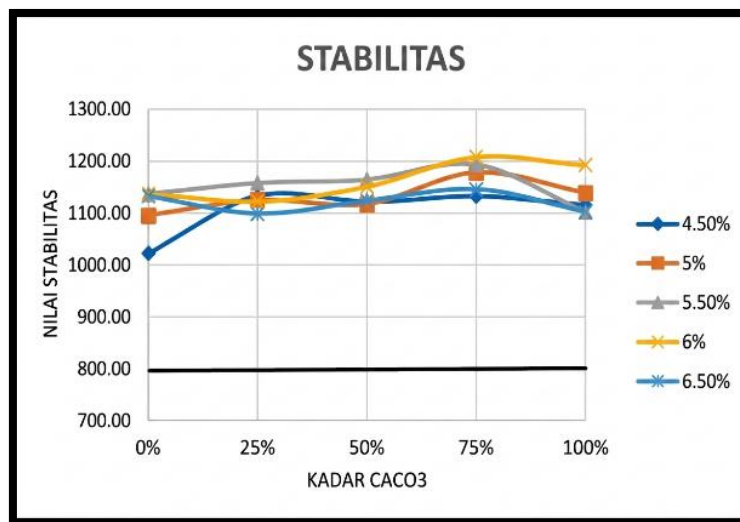
Tabel 4 . Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall

CACO3	Kadar Aspal	0%	25%	50%	75%	100%
NILAI REKAP PERBANDINGAN STABILITAS						
CACO3	4,50%	1021,56	1132,21	1121,51	1132,22	1114,93
	5%	1096,51	1125,6	1118,32	1178,13	1139,58
	5,50%	1137,22	1157,89	1164,44	1193,32	1102,73
	6%	1137,74	1122,64	1151,66	1209,05	1192,39
	6,50%	1132,6	1098,6	1123,49	1146,63	1102,73
NILAI REKAP PERBANDINGAN FLOW						
CACO3	4,50%	2,98	2,6	2,4	2,25	2,33
	5%	3,13	2,64	2,92	2,74	3,17
	5,50%	3,17	3,11	3,33	3,17	3,4
	6%	3,5	3,38	3,33	3,26	3,33
	6,50%	3,5	3,43	3,47	3,4	3,43
NILAI REKAP PERBANDINGAN VIM						
CACO3	4,50%	6,51	6,43	5,77	5,37	5,14
	5%	6,1	6,1	5,35	4,58	4,87
	5,50%	4,32	3,88	5,12	3,35	3,89
	6%	3,61	3,69	3,29	3,41	3,06
	6,50%	3,11	3,25	3,1	3,03	3,01
NILAI REKAP PERBANDINGAN VMA						
CACO3	4,50%	15,6	15,6	15	14,64	14,44
	5%	15,37	16,32	15,66	14,97	15,23
	5,50%	15,78	15,39	16,48	14,93	15,4
	6%	16,18	16,25	15,9	16,01	15,7
	6,50%	16,76	16,88	16,76	16,69	16,67
NILAI REKAP PERBANDINGAN VFB						
CACO3	4,50%	343,95	437,59	471,43	503,97	482,9
	5%	351,06	434,13	383,48	432,26	321,76
	5,50%	358,82	378,35	350,34	376,11	325,24
	6%	342,68	331,93	343,77	377,65	357,98
	6,50%	325,76	320,01	327,28	334,34	321,76
NILAI REKAP PERBANDINGAN MQ						
CACO3	4,50%	343,95	437,59	471,43	503,97	482,9
	5%	351,06	434,13	383,48	432,26	321,76
	5,50%	358,82	378,35	350,34	376,11	325,24
	6%	342,68	331,93	343,77	377,65	357,98
	6,50%	325,76	320,01	327,28	334,34	321,76
NILAI REKAP PERBANDINGAN DENSITY						
CACO3	4,50%	2,33	2,334448	2,350845	2,360953	2,366501
	5%	2,35	2,326464	2,345025	2,363993	2,356802

CACO3	Kadar Aspal	0%	25%	50%	75%	100%
	5,50%	2,35	2,364973	2,334314	2,377855	2,364719
	6%	2,36	2,353313	2,363164	2,360118	2,368653
	6,50%	2,35	2,348091	2,351592	2,353414	2,3539
NILAI REKAP PERBANDINGAN KAO						
CACO3		5,8	5,85	5,95	5,9	5,8

3.3.1 Pengaruh Penambahan CaCO₃ Terhadap Stabilitas

Bagian ini mengkaji dampak penggunaan kalsium karbonat (CaCO₃) sebagai material pengganti sebagian bahan pengisi (filler) terhadap stabilitas Marshall pada campuran AC-WC. Pengkajian dilakukan melalui perbandingan nilai stabilitas pada masing-masing variasi campuran guna menilai kapasitas campuran dalam menahan beban maksimum sebelum mengalami kegagalan struktural. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Gambar 3.

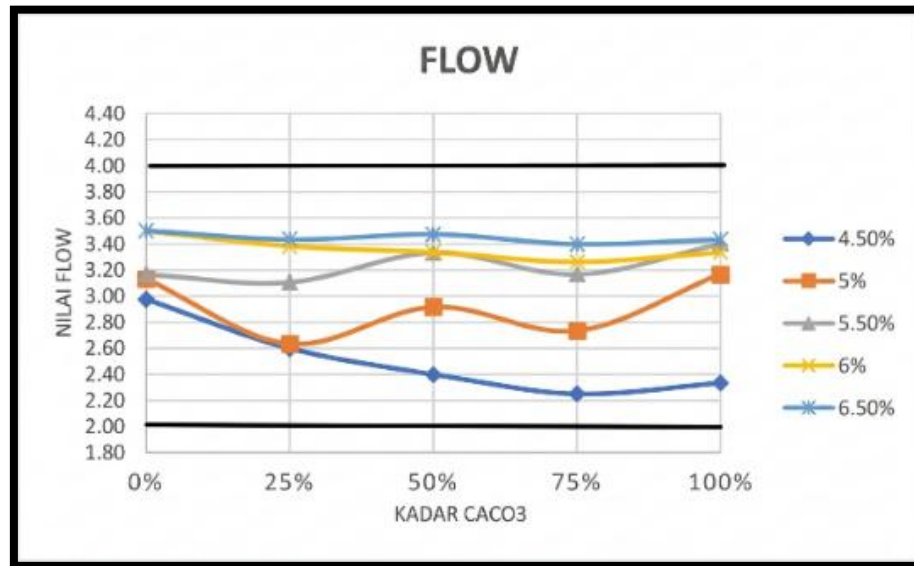


Gambar 3. Perubahan nilai stabilitas terhadap variasi kadar CaCO₃ pada berbagai konsentrasi campuran

Secara keseluruhan, penggunaan kalsium karbonat (CaCO₃) sebagai bahan tambahan filler menunjukkan kecenderungan meningkatkan nilai stabilitas Marshall campuran AC-WC dibandingkan dengan campuran yang tidak menggunakan CaCO₃. Nilai stabilitas tertinggi umumnya diperoleh pada tingkat substitusi 75%. Pada kadar aspal 4,50%, 5,00%, 5,50%, 6,00%, dan 6,50%, nilai maksimum yang dihasilkan berturut-turut sebesar 1132,22; 1178,13; 1193,32; 1209,05; dan 1146,63. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh kemampuan partikel CaCO₃ dalam mengisi rongga di antara agregat serta membentuk mastic yang lebih kaku, sehingga ikatan dan kontak antarbutir menjadi lebih kuat dalam menahan beban. Pada tingkat substitusi 100%, nilai stabilitas menunjukkan kecenderungan menurun. Kondisi tersebut diduga terjadi karena kandungan filler yang terlalu tinggi meningkatkan kekakuan mastic secara berlebihan sehingga menghambat kemampuan aspal dalam menyelimuti permukaan agregat secara merata. Sebaliknya, penggunaan CaCO₃ pada tingkat substitusi 75% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi. Komposisi tersebut memberikan keseimbangan yang lebih optimal antara kemampuan pengisian rongga, tingkat kekakuan campuran, dan daya ikat antara aspal dengan agregat

3.3.2 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap Flow

Bagian ini menguraikan pengaruh penggunaan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai substitusi filler terhadap nilai flow Marshall pada campuran AC-WC.. Nilai flow pada masing-masing variasi campuran dibandingkan untuk mengevaluasi tingkat fleksibilitas campuran serta besarnya perubahan bentuk yang terjadi saat menerima beban maksimum. Hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perubahan nilai flow terhadap variasi kadar CaCO_3 pada berbagai konsentrasi campuran

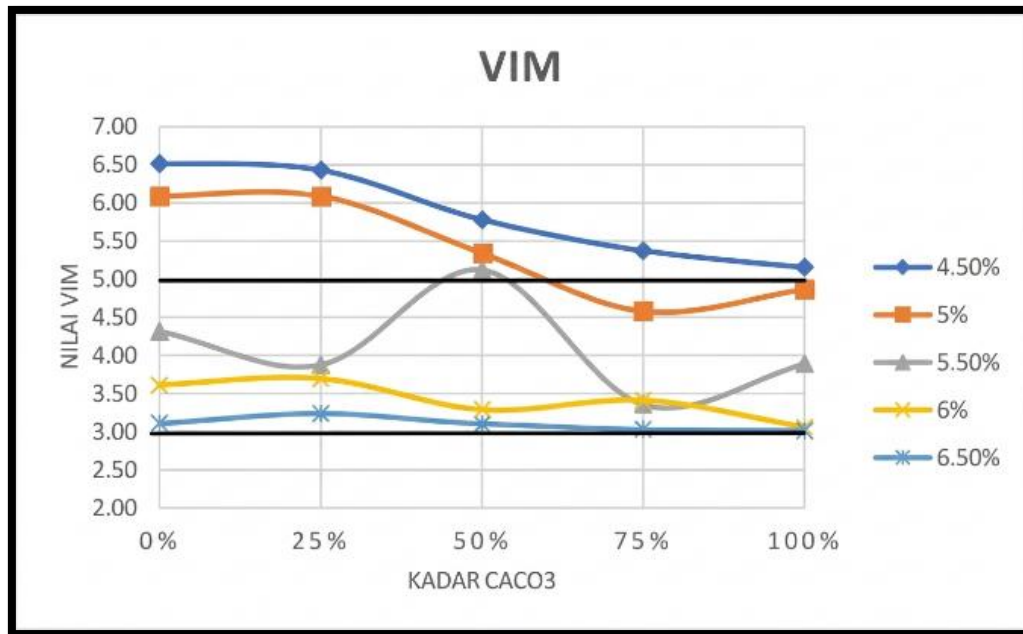
Secara keseluruhan, substitusi filler menggunakan CaCO_3 cenderung menurunkan nilai flow campuran AC-WC, terutama pada campuran dengan kadar aspal rendah dan proporsi substitusi hingga 75%. Kondisi tersebut disebabkan oleh partikel CaCO_3 yang mengisi rongga di antara agregat dan membentuk mastic dengan tingkat kekakuan lebih tinggi, sehingga pergerakan butiran dan deformasi campuran ketika menerima beban menjadi semakin terbatas. Namun, kecenderungan tersebut tidak terjadi secara seragam pada seluruh variasi. Pada kadar aspal 5,50% dengan substitusi CaCO_3 sebesar 100%, nilai flow kembali meningkat, yang mengindikasikan terjadinya perubahan proporsi keseimbangan antara filler dan aspal, sehingga campuran menjadi lebih rentan terhadap deformasi. Dengan demikian, Perubahan nilai flow akibat penggunaan CaCO_3 dipengaruhi oleh keseimbangan antara kadar aspal dan persentase substitusi bahan pengisi (filler) yang diterapkan pada campuran.

3.3.3 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap VIM

Bagian ini mengkaji pengaruh penggunaan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai bahan pengganti filler terhadap nilai void in mix (VIM) pada campuran AC-WC. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai VIM pada setiap variasi campuran untuk menilai perubahan persentase rongga udara dan tingkat kepadatan campuran setelah proses pemadatan. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 5.

Secara umum, penggunaan CaCO_3 sebagai bahan substitusi filler menunjukkan kecenderungan menurunkan nilai VIM pada campuran AC-WC, terutama pada kadar aspal 4,50% dan 5,00%. Penurunan tersebut diduga disebabkan oleh kemampuan partikel CaCO_3 dalam mengisi ruang kosong di antara butiran agregat. Kondisi ini mengurangi volume rongga udara dan menghasilkan susunan campuran yang lebih padat. Pada kadar aspal 6,00% dan 6,50%, penggunaan CaCO_3 memberikan pengaruh yang relatif terbatas terhadap nilai VIM karena perubahan yang dihasilkan berada pada rentang yang sempit. Meskipun demikian, peningkatan persentase substitusi CaCO_3 tetap memperlihatkan kecenderungan menurunkan nilai VIM campuran. Meskipun demikian, kecenderungan penurunan nilai VIM tidak menunjukkan pola yang linier. Kecenderungan tersebut terlihat pada campuran dengan kadar aspal 5,50% dan substitusi CaCO_3 sebesar 50% yang justru mengalami peningkatan nilai VIM. Temuan

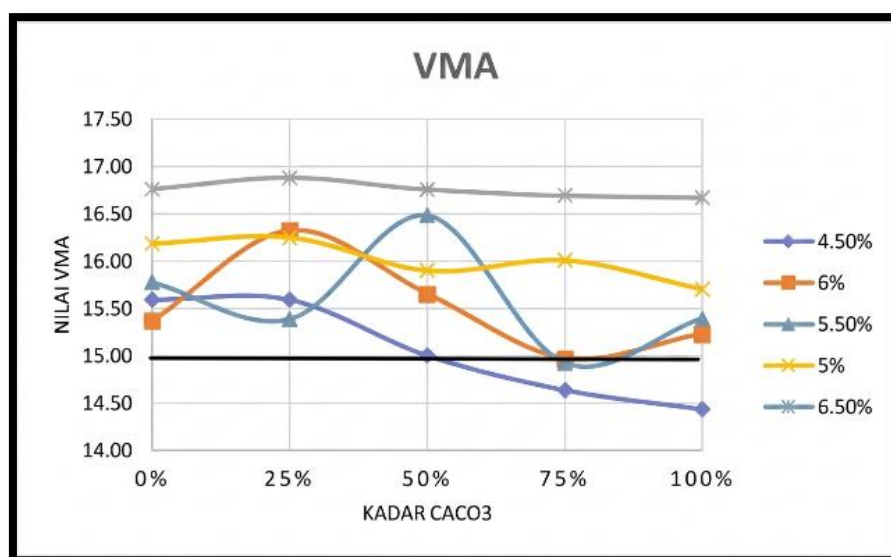
tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan CaCO_3 dalam memperkecil rongga udara tidak hanya ditentukan oleh jumlah bahan pengisi yang digunakan, tetapi juga oleh interaksi antara kadar aspal dan persentase substitusi filler dalam campuran.



Gambar 5. Perubahan nilai VIM terhadap variasi kadar CaCO_3 pada berbagai konsentrasi campuran

3.3.4 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap VMA

Bagian ini membahas pengaruh substitusi kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai filler terhadap nilai VMA pada campuran AC-WC. Analisis perbandingan nilai void in mineral aggregate (VMA) dilakukan untuk mengevaluasi perubahan volume rongga antarbutir agregat dalam campuran setelah proses pemadatan. Hasil pengujian dan perbandingan nilai VMA pada setiap variasi campuran ditampilkan pada Gambar 6.

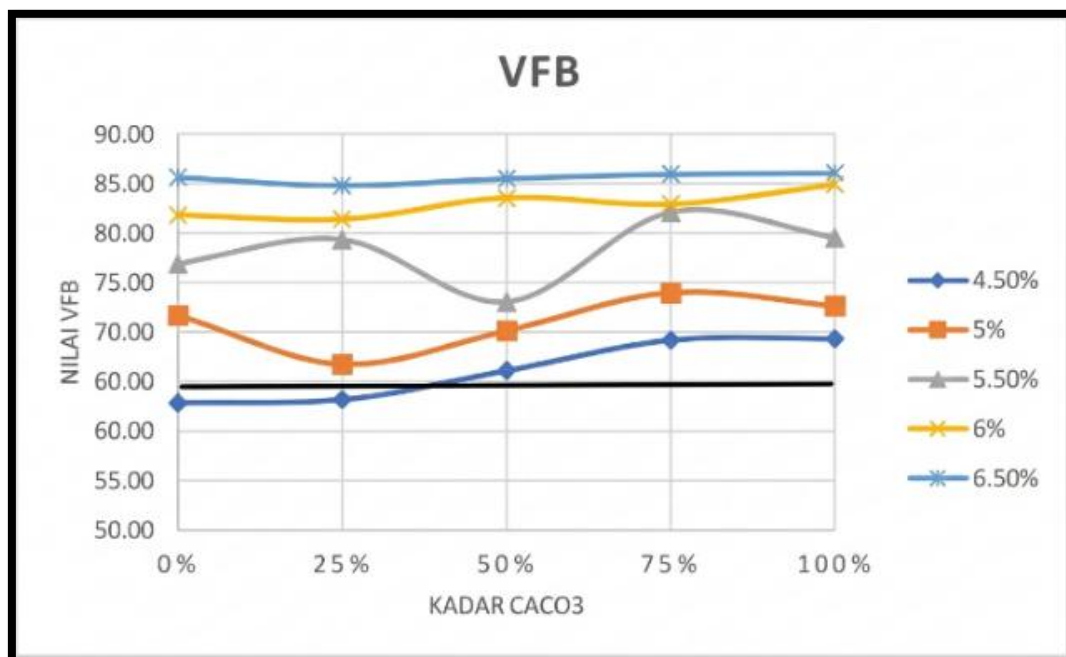


Gambar 6. Perubahan Nilai VMA sebagai Fungsi Kadar CaCO_3 pada Berbagai Konsentrasi

Secara keseluruhan, penggunaan CaCO_3 sebagai bahan substitusi filler memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai void in mineral aggregate (VMA) pada campuran AC-WC., terutama pada kadar aspal yang relatif rendah. Penurunan nilai VMA yang paling konsisten ditemukan pada kadar aspal 4,50%. Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan kemampuan partikel halus CaCO_3 dalam mengisi celah antarbutir agregat dan meningkatkan kerapatan susunan partikel, sehingga volume rongga pada kerangka agregat menjadi lebih kecil. Pada kadar aspal 5,00%, penurunan VMA paling nyata terjadi pada substitusi 75%, meskipun pola perubahannya belum sepenuhnya seragam. Pada kadar aspal 5,50% hingga 6,50%, nilai void in mineral aggregate (VMA) menunjukkan pola yang berfluktuasi dalam kisaran yang relatif sempit. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh perubahan proporsi antara volume filler, kandungan aspal, dan konfigurasi butiran agregat dalam campuran. Oleh karena itu, besarnya pengaruh CaCO_3 terhadap nilai VMA ditentukan oleh kombinasi persentase substitusi dan kadar aspal yang diterapkan.

3.3.5 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap VFB

Bagian ini membahas pengaruh pemanfaatan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai bahan substitusi filler terhadap nilai void filled with bitumen (VFB) pada campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC). Analisis VFB dilakukan untuk menilai persentase rongga dalam agregat yang terisi aspal setelah campuran mengalami proses pemadatan. Parameter ini merepresentasikan tingkat pengisian rongga antarbutir agregat oleh aspal, sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan distribusi bahan pengikat dalam struktur campuran. Hasil pengujian nilai VFB disajikan pada Gambar 7.



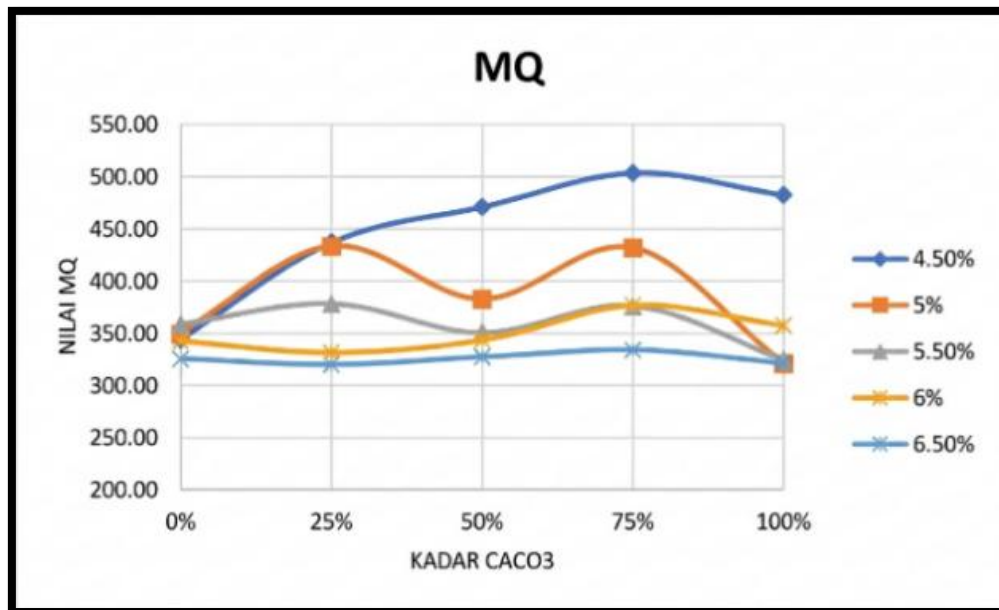
Gambar 7. Perubahan Nilai VFB sebagai Fungsi Kadar CaCO_3 pada Berbagai Konsentrasi

Secara umum, penggunaan CaCO_3 sebagai bahan substitusi filler menunjukkan kecenderungan meningkatkan nilai void filled with bitumen (VFB) pada berbagai variasi kadar aspal. Peningkatan tersebut diduga terjadi akibat kemampuan partikel CaCO_3 dalam mengisi celah antarbutir agregat, sehingga susunan campuran menjadi lebih padat dan terjadi peningkatan proporsi rongga antarbutir agregat yang terisi oleh aspal. Kecenderungan peningkatan paling konsisten terlihat pada kadar aspal 4,50%, sedangkan pada kadar aspal 5,00% dan 5,50% nilai VFB masih berfluktuasi, terutama pada substitusi 25% dan 50%. Namun, pada substitusi 75%, nilai VFB kembali meningkat. Pada kadar aspal 6,00% dan 6,50%, peningkatan VFB terlihat lebih seragam, khususnya pada tingkat substitusi yang

tinggi. Dengan demikian, pengaruh CaCO_3 terhadap VFB berkaitan dengan kemampuannya mengurangi rongga udara dan meningkatkan keterisian rongga oleh aspal, meskipun besar perubahannya tetap dipengaruhi oleh kadar aspal dan persentase substitusi filler.

3.3.6 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap MQ

Bagian ini membahas pengaruh substitusi kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai filler terhadap nilai MQ pada campuran AC-WC. Perbandingan Parameter MQ merepresentasikan kekakuan campuran dan ketahanannya terhadap deformasi permanen yang ditimbulkan oleh beban lalu lintas.. Hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Gambar 8.

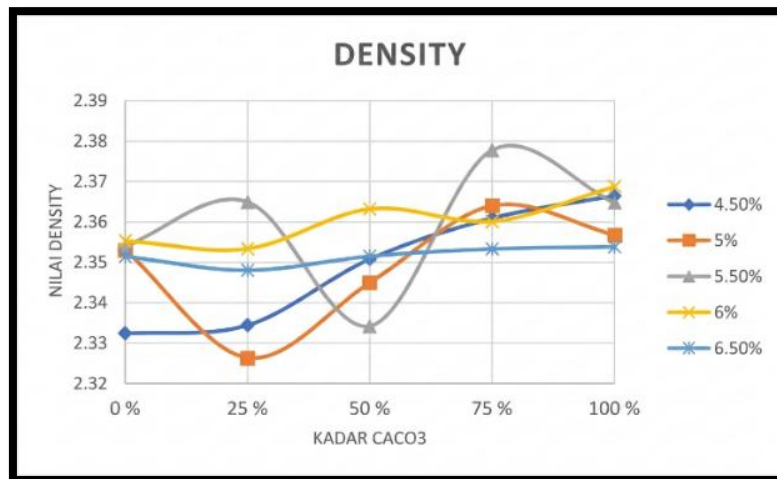


Gambar 8. Perubahan nilai MQ terhadap variasi kadar CaCO_3 pada berbagai konsentrasi campuran

Secara umum, substitusi filler dengan CaCO_3 cenderung meningkatkan nilai Marshall Quotient (MQ) campuran AC-WC pada sebagian besar kadar aspal. Peningkatan nilai tersebut mengindikasikan bahwa campuran memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi serta ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi, mengingat nilai Marshall Quotient diperoleh dari perbandingan antara stabilitas dan flow. Kenaikan paling nyata umumnya terjadi pada substitusi 75%, sejalan dengan meningkatnya stabilitas dan menurunnya flow pada variasi tersebut. Namun, pola peningkatan MQ tidak berlangsung secara linier, karena pada beberapa kombinasi kadar aspal, terutama substitusi 100% pada kadar aspal 5,00% dan 6,50%, nilai MQ kembali menurun. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan filler yang berlebihan dapat mengganggu keseimbangan kekakuan dan deformasi campuran. Dengan demikian, pengaruh CaCO_3 terhadap MQ tetap ditentukan oleh kadar aspal dan persentase substitusi filler yang digunakan.

3.3.7 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap Density

Bagian ini membahas pengaruh substitusi kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai filler terhadap nilai density pada campuran AC-WC. Nilai density pada setiap variasi dibandingkan untuk menilai tingkat kepadatan campuran dan kerapatan susunan material yang terbentuk setelah pemadatan. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Gambar 9.

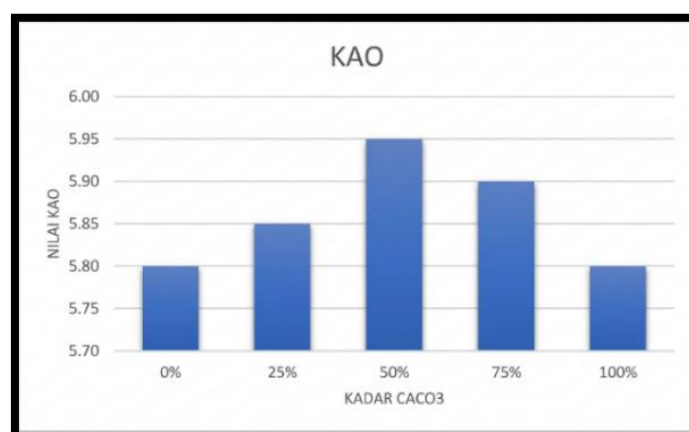


Gambar 9. Perubahan nilai Density terhadap variasi kadar CaCO_3 pada berbagai konsentrasi campuran

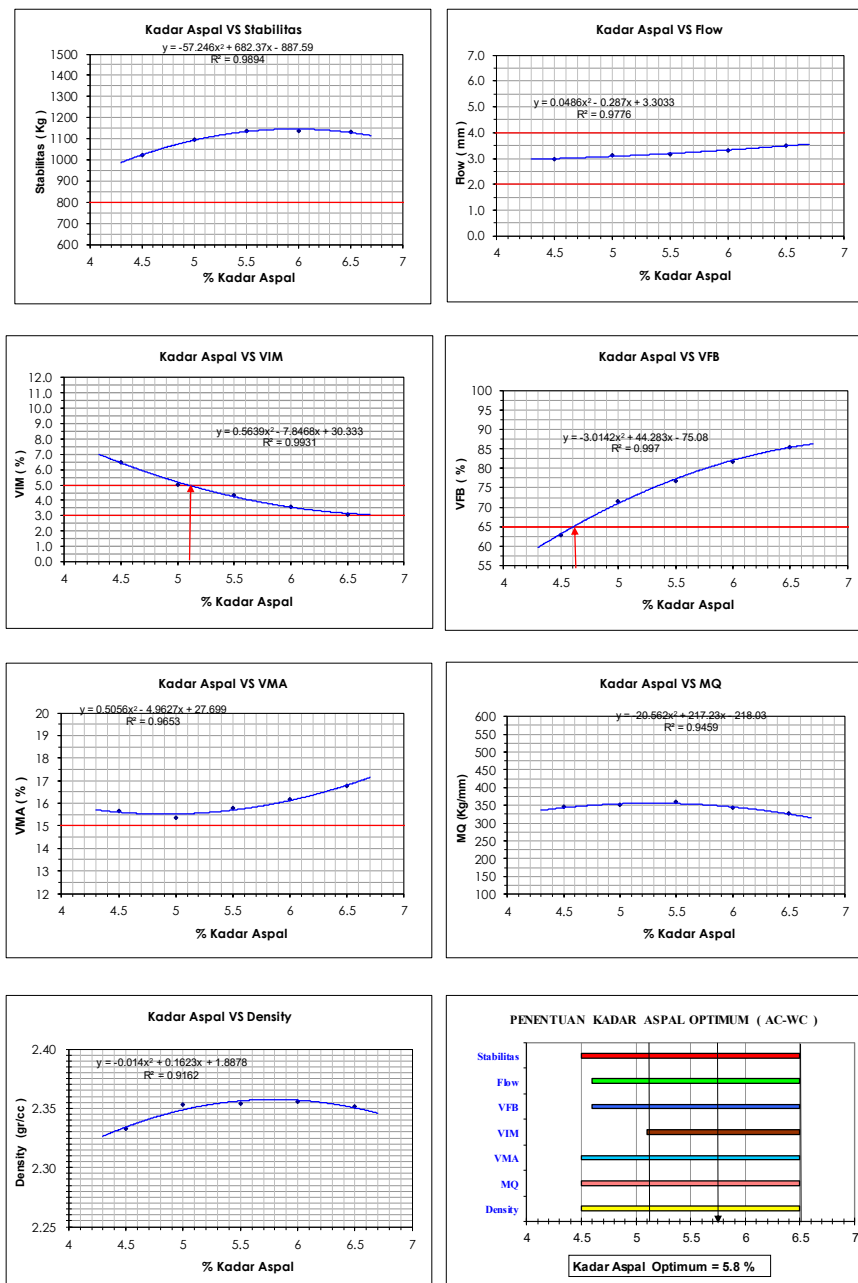
Secara umum, penggunaan CaCO_3 sebagai bahan substitusi filler menunjukkan kecenderungan meningkatkan nilai densitas campuran AC-WC, terutama pada kadar aspal rendah sampai menengah. Kondisi tersebut terjadi karena partikel CaCO_3 yang memiliki ukuran partikel halus sehingga mampu mengisi celah antarbutir agregat dan meningkatkan kerapatan susunan partikel, sehingga struktur campuran menjadi lebih padat. Kecenderungan peningkatan paling konsisten terlihat pada kadar aspal 4,50%, sedangkan pada kadar aspal 5,00% dan 5,50% nilainya berfluktuasi, meskipun densitas tertinggi umumnya diperoleh pada substitusi 75%. Pada kadar aspal 6,00%, Peningkatan densitas tampak lebih jelas pada tingkat substitusi yang tinggi, sedangkan pada kadar aspal 6,50% perubahan yang terjadi relatif kecil. Kenaikan densitas tersebut berkaitan dengan menurunnya nilai VIM dan meningkatnya VFB, yang menunjukkan bahwa volume rongga udara semakin berkurang dan persentase rongga antarbutir agregat yang terisi oleh aspal menjadi semakin tinggi. Oleh karena itu, pengaruh CaCO_3 terhadap densitas campuran tetap bergantung pada kadar aspal serta persentase substitusi filler yang digunakan.

3.3.8 Pengaruh Penambahan CaCO_3 Terhadap KAO

Bagian ini membahas penetapan kadar aspal optimum (KAO) pada campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) yang menggunakan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai material substitusi filler. Nilai KAO dibandingkan untuk menetapkan kadar aspal optimum yang dapat menghasilkan karakteristik Marshall sesuai spesifikasi teknis. Data hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 11. Perubahan Nilai KAO sebagai Fungsi Kadar CaCO_3 pada Berbagai Konsentrasi



Gambar 11. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) pada Variasi CaCO_3

Secara umum, penambahan CaCO_3 memberikan pengaruh kecil terhadap nilai KAO. Nilai KAO cenderung meningkat tipis dari substitusi 0% hingga 50%, yaitu dari 5,80 menjadi 5,95, kemudian menurun kembali pada substitusi 75% dan 100%. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan CaCO_3 pada tingkat rendah hingga menengah dapat sedikit meningkatkan kebutuhan kadar aspal optimum, sedangkan pada substitusi tinggi kebutuhan aspal kembali mendekati kondisi awal. Dengan rentang perubahan yang hanya sebesar 0,15%, pengaruh CaCO_3 terhadap KAO dapat disimpulkan bersifat moderat dan tidak menyebabkan perubahan kadar aspal optimum yang signifikan.

4. KESIMPULAN

Seluruh bahan penyusun campuran AC-WC telah memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Aspal Shell penetrasi 60/70 memenuhi persyaratan dengan nilai penetrasi 66,80, titik lembek 52,30°C, titik nyala 270°C, berat jenis 1,067, dan daktilitas 113,5 cm. Hasil

pengujian memperlihatkan bahwa agregat kasar memiliki nilai abrasi Los Angeles sebesar 18,08% dan berat jenis 2,694. Sementara itu, agregat halus memiliki berat jenis 2,604 serta nilai sand equivalent sebesar 90,20%. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh material dinyatakan memenuhi persyaratan untuk digunakan dalam campuran AC-WC.

Penggantian sebagian filler abu batu dengan kalsium karbonat (CaCO_3) memengaruhi karakteristik Marshall pada campuran AC-WC. Secara umum, penambahan CaCO_3 memperlihatkan kecenderungan meningkatkan nilai stabilitas, Marshall Quotient (MQ), void filled with bitumen (VFB), dan densitas campuran, serta menyebabkan penurunan nilai flow, void in mix (VIM), dan void in mineral aggregate (VMA) pada beberapa variasi komposisi. Perubahan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa partikel halus CaCO_3 berperan dalam mengisi ruang kosong antarbutir agregat, sehingga menghasilkan struktur campuran yang lebih rapat serta meningkatkan tingkat kekakuan dan kemampuan campuran dalam menerima beban. Tingkat perubahan yang terjadi tetap bergantung pada kadar aspal dan proporsi substitusi filler yang diterapkan.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian Marshall, campuran dengan penggunaan CaCO_3 sebagai substitusi filler sebesar 75% pada kadar aspal 6,00% menunjukkan performa terbaik dalam penelitian ini. Komposisi tersebut mampu menghasilkan keseimbangan yang optimal antara karakteristik stabilitas, flow, densitas, serta parameter volumetrik campuran. Berdasarkan temuan penelitian, penggunaan CaCO_3 dengan proporsi substitusi sebesar 75% menunjukkan potensi sebagai material alternatif untuk menggantikan sebagian filler pada campuran AC-WC.

Penelitian ini berfokus pada penilaian karakteristik campuran AC-WC melalui pengujian Marshall. Berdasarkan ruang lingkup tersebut, hasil penelitian dapat menunjukkan pengaruh substitusi CaCO_3 terhadap stabilitas, deformasi, tingkat kepadatan, serta sifat volumetrik campuran. Pengujian durabilitas, Indirect Tensile Strength, rutting test, serta ketahanan terhadap pengaruh air dan pembebanan berulang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya untuk memperluas evaluasi kinerja campuran dalam kondisi pelayanan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Joumbat, Z. Al Masri, G. G. Al-Khateeb, "State-of-the-Art Review on Permanent Deformation Characterization of Asphalt Concrete Pavements," *Sustainability*, vol. 15, no. 2, p. 1166, 2023.
- [2] E. Sulandari, S. Widodo, S. Mayuni, F. Falderika, and S. Sutarno, "Evaluasi Karakteristik Agregat terhadap Kerusakan Rutting pada Campuran Split Mastic Asphalt Halus," *HPJI*, vol. 11, no. 2, pp. 139–148, 2025.
- [3] R. I. Dayanti, I. Irwansyah, dan W. Alamsyah, "Abu Batu Kapur Sebagai Alternatif Filler dalam Campuran Aspal Beton untuk Lapisan Aus," *Jurnal Telsinas*, vol. 7, no. 1, pp. 65–73, 2024. DOI:10.38043/telsinas.v7i1.5096
- [4] O. Maranatha, S. Widodo, dan H. Azwansyah, "Pemanfaatan Kapur Tohor, Kapur Padam dan Kapur Karbonat sebagai Filler pada Perkerasan AC-WC Ditinjau dari Karakteristik Marshall," *JeLAST*, vol. 8, no. 1, 2021. DOI:10.26418/jelast.v8i1.45011.
- [5] R. T. Wiranto, S. Thioritz, dan Mursalim, "Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan Kalsium Karbonat (CaCO_3) sebagai Filler dalam Campuran Lapis Permukaan Aspal Porus terhadap Karakteristik Marshall," *Jurnal Media Teknik Sipil*, vol. 1, no. 2, pp. 45–54, 2023. DOI:10.56963/judiateks.v1i2.34
- [6] W. Mulansari dan Y. Risdianto, "Penggunaan ASBUTON LGA dan Kalsium Karbonat pada Perkerasan Jalan AC-WC terhadap Pengujian Marshall," *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, vol. 13, no. 02, pp. 354–362, 2025. DOI:10.26740/rekats.v13n02.p354-362.
- [7] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*, Bandung: Alfabeta, 2019.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, SNI 06-2489-1991: *Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional, 1991.
- [9] Asphalt Institute, *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*, 7th ed. Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2014.

- [10] ASTM International, ASTM D6927: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [11] Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, Revisi 2. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020.
- [12] E. Sulandari, Y. Lestyowati, F. Felderika, and S. Sutarno, "Analisis Pengaruh Sifat Volumetrik pada Campuran AC-WC," CRANE: Civil Engineering Research Journal, vol. 5, no. 2, pp. 41–47, 2024, doi: 10.34010/crane.v5i2.14070.
- [13] G. C. Avelia, E. Sulandari, and H. Azwansyah, "Pengaruh Karakteristik Agregat Terhadap Kinerja Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)," Jurnal Serambi Engineering, vol. X, no. 4, pp. 15493–15502, Oct. 2025.
- [14] M. R. Cahyani, E. Sulandari, S. Widodo, E. T. Mukti, and H. Azwansyah, "Effect of Asphalt Content on the Surface Texture of Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) Mixture," Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, vol. 29, pp. 139–148, 2025.