



Substitusi Kombinasi Abu Arang Tempurung Kelapa dan Abu Sekam Padi Sebagai Filler terhadap Karakteristik Marshall pada Campuran AC-WC

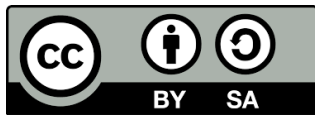
Berlian S.O Kawung, Rilya Rumbayan*, Don Radius Gerald Kabo

Politeknik Negeri Manado, Indonesia

Email: Rilya.rumbayan@polimdo.ac.id*

Keywords:

Coconut Shell Charcoal Ash;
Rice Husk Ash; Filler;
Marshall.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Publikasiku Publisher

Kata Kunci:

AC-WC; Abu Arang
Tempurung Kelapa; Abu
Sekam Padi; Filler; Marshall.

Abstract

Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) mixtures require good mechanical and volumetric characteristics to support pavement performance. One of the important components in asphalt mixtures is filler, which functions to fill voids between aggregates and improve bonding within the mixture. This study aims to analyze the effect of combined coconut shell charcoal ash and rice husk ash substitution as filler on the Marshall characteristics of AC-WC mixtures. The research was conducted using an experimental laboratory method through Marshall testing. The filler substitution variations consisted of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of the total filler requirement of 2% at an optimum asphalt content of 6.50%. The tested parameters included stability, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Bitumen (VFB), and Marshall Quotient (MQ). The results showed that increasing the substitution of combined coconut shell charcoal ash and rice husk ash affected the Marshall characteristics of AC-WC mixtures. The 100% substitution variation produced the highest stability of 1637.74 kg and Marshall Quotient (MQ) of 496.44 kg/mm compared to other variations. Based on Marshall characteristics evaluation, the combination of coconut shell charcoal ash and rice husk ash showed potential as an alternative filler material for AC-WC mixtures. However, further studies regarding durability, water resistance, and permanent deformation are still required.

Abstrak

Campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) membutuhkan karakteristik mekanis dan volumetrik yang baik untuk mendukung kinerja perkerasan jalan. Salah satu komponen penting dalam campuran beraspal adalah filler yang berfungsi mengisi rongga antar agregat dan meningkatkan ikatan dalam campuran. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai filler terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen laboratorium menggunakan pengujian Marshall. Variasi substitusi filler terdiri atas 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari total kebutuhan filler sebesar 2% pada kadar aspal optimum 6,50%. Parameter pengujian meliputi stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient (MQ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi memengaruhi karakteristik Marshall campuran AC-WC. Variasi substitusi 100% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi sebesar 1637,74 kg dan MQ sebesar 496,44 kg/mm dibandingkan variasi lainnya. Berdasarkan hasil pengujian, kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi berpotensi digunakan sebagai alternatif filler pada campuran AC-WC.

Namun, pengujian lanjutan terkait durabilitas, ketahanan air, dan deformasi permanen masih diperlukan.

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan memiliki peranan penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan pertumbuhan ekonomi suatu wilayah. Jalan berfungsi sebagai prasarana transportasi yang menghubungkan pusat kegiatan ekonomi, distribusi barang, serta meningkatkan aksesibilitas antarwilayah. Salah satu jenis struktur perkerasan yang banyak digunakan pada konstruksi jalan adalah perkerasan lentur (*flexible pavement*) dengan campuran beraspal sebagai lapisan permukaan. Salah satu lapisan yang memiliki peranan penting adalah *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)*, yaitu lapisan paling atas yang secara langsung menerima beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan sehingga membutuhkan karakteristik campuran yang memiliki stabilitas, durabilitas, dan ketahanan terhadap deformasi yang baik (Rosyidah, 2024).

Dalam perencanaan campuran AC-WC, setiap komponen penyusun memiliki fungsi penting dalam menentukan kinerja campuran. Salah satu material yang berperan dalam meningkatkan karakteristik campuran adalah *filler*. *Filler* merupakan material berbutir halus yang berfungsi mengisi rongga antar agregat serta membentuk *asphalt mastic* bersama aspal sehingga dapat mempengaruhi kohesi, kekakuan, stabilitas, dan karakteristik *volumetrik* campuran seperti *Void in Mix (VIM)*, *Void in Mineral Aggregate (VMA)*, dan *Void Filled with Bitumen (VFB)* (Louis, 2025).

Penggunaan *filler* konvensional seperti abu batu dan semen masih banyak diterapkan pada campuran beraspal. Namun, penggunaan material tersebut memiliki beberapa keterbatasan, baik dari aspek ketersediaan bahan maupun dampak lingkungan. Produksi semen membutuhkan energi yang besar dan menghasilkan emisi karbon, sedangkan eksploitasi material abu batu dapat menyebabkan gangguan terhadap lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material *filler* yang lebih berkelanjutan dengan tetap memenuhi persyaratan teknis campuran beraspal (Amiwarti et al., 2024).

Salah satu alternatif material yang berpotensi digunakan sebagai *filler* adalah limbah hasil pembakaran biomassa berupa abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi. Abu sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi serta ukuran partikel yang halus sehingga berpotensi meningkatkan interaksi antara *filler*, aspal, dan agregat. Sementara itu, abu arang tempurung kelapa memiliki karakteristik fisik yang memungkinkan meningkatkan ikatan antar material dalam campuran beraspal. Kedua material tersebut memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai substitusi *filler* dalam campuran AC-WC (Putri & Widayanti, 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penggunaan abu sekam padi maupun abu tempurung kelapa secara terpisah sebagai material alternatif pada campuran beraspal dan menunjukkan adanya perubahan terhadap parameter Marshall. Arabani dan Tahami (2015) mengkaji abu sekam padi sebagai modifikasi silikat pada aspal dan menemukan bahwa kandungan silika yang tinggi dapat meningkatkan interaksi antara aspal dan agregat. Kusbiantoro (2023) menganalisis *filler* alternatif pada campuran beraspal dan menunjukkan bahwa material berbasis limbah dapat menghasilkan karakteristik Marshall yang memenuhi persyaratan spesifikasi. Mistry dan Roy (2016) melakukan tinjauan terhadap

berbagai *filler* alternatif dalam campuran beraspal dan menemukan bahwa karakteristik fisik dan kimia *filler* sangat memengaruhi kinerja campuran, terutama pada parameter stabilitas dan durabilitas. Modarres dan Hamedi (2014) mengkaji pengaruh abu limbah batu bara sebagai *filler* dan menemukan bahwa material tersebut dapat meningkatkan stabilitas Marshall serta ketahanan campuran terhadap deformasi. Valentin et al. (2021) mengkarakterisasi debu tambang dan produk samping industri sebagai substitusi *filler* tradisional serta menganalisis pengaruhnya terhadap ketahanan air campuran beton aspal. Zhang et al. (2021) meninjau mekanisme interaksi aspal-*filler* dan menegaskan bahwa rasio *filler* terhadap aspal merupakan faktor kunci dalam menentukan kekakuan dan stabilitas campuran. Ramadhani et al. (2026) menganalisis karakteristik Marshall dan penentuan kadar aspal optimum pada campuran AC-WC dengan substitusi 50% *filler* menggunakan abu sekam padi dan abu tempurung kelapa, dan menemukan bahwa kombinasi kedua material tersebut menghasilkan karakteristik Marshall yang memenuhi persyaratan. Namun, penelitian mengenai penggunaan kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai substitusi *filler* masih relatif terbatas, terutama dalam mengevaluasi pengaruhnya terhadap keseluruhan parameter Marshall pada campuran AC-WC. Keterbatasan kajian tersebut menjadi dasar pentingnya penelitian mengenai kombinasi kedua material limbah tersebut sebagai *filler* alternatif. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan variasi substitusi lengkap 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dengan rasio kombinasi 1:1 antara abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi, serta analisis simultan seluruh parameter Marshall sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

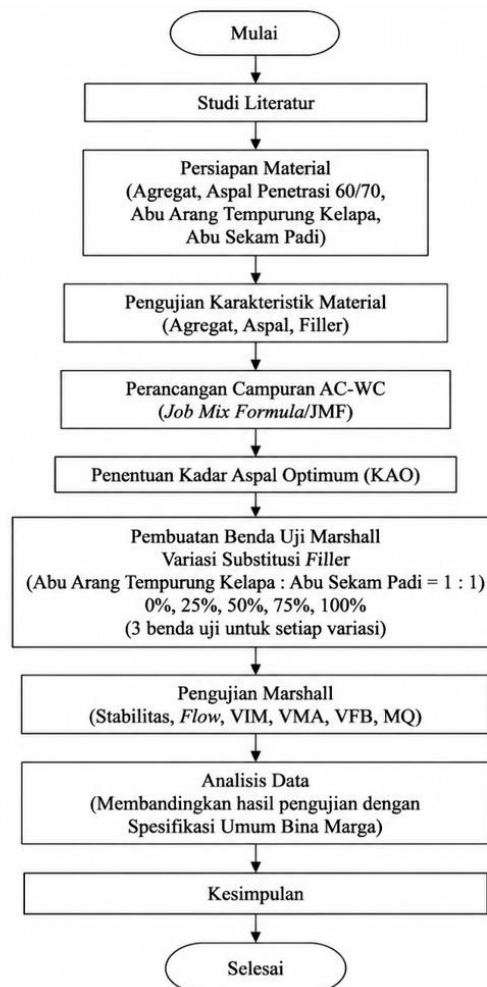
Secara teoritis, kombinasi abu sekam padi yang memiliki kandungan silika tinggi dan abu arang tempurung kelapa yang memiliki karakteristik fisik halus berpotensi memberikan kontribusi terhadap perubahan sifat mekanis dan volumetrik campuran AC-WC. Oleh karena itu, diperlukan kajian eksperimental untuk mengetahui karakteristik Marshall campuran AC-WC dengan substitusi kombinasi kedua material tersebut (Putri & Widayanti, 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai *filler* terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Variasi substitusi *filler* yang digunakan yaitu 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari total *filler* 2%, dengan parameter pengujian meliputi stabilitas, *flow*, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Bitumen (VFB), dan Marshall Quotient (MQ). Secara teoretis, penelitian ini diharapkan memperkaya kajian pemanfaatan limbah biomassa sebagai *filler* alternatif dalam campuran beraspal, khususnya pada campuran AC-WC, serta memberikan kontribusi pada pengembangan material konstruksi jalan yang lebih berkelanjutan. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi perencana dan pelaksana konstruksi jalan dalam memanfaatkan abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai substitusi *filler* yang ramah lingkungan, bagi industri konstruksi dalam mengurangi ketergantungan pada *filler* konvensional seperti semen dan abu batu, serta bagi masyarakat dalam mengurangi timbunan limbah biomassa. Bagi peneliti selanjutnya, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi untuk kajian durabilitas, ketahanan air, dan deformasi permanen campuran beraspal dengan *filler* alternatif.

METODE PENELITIAN

Jenis Dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis karakteristik Marshall campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) dengan substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai filler. Penelitian dilakukan melalui serangkaian tahapan yang meliputi studi literatur, persiapan material, pengujian karakteristik material, perancangan campuran AC-WC, penentuan kadar aspal optimum (KAO), pembuatan benda uji Marshall, pengujian karakteristik Marshall, serta analisis data hasil pengujian.



Gambar 1. Bagan Alur Penelitian

Sumber: Data Penulis

Objek dan Lingkup Penelitian

Objek penelitian ini adalah campuran beraspal panas *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan penggunaan kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai material substitusi filler. Penelitian dibatasi pada evaluasi karakteristik campuran berdasarkan pengujian Marshall di laboratorium. Variabel bebas dalam penelitian adalah persentase substitusi filler kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi,

sedangkan variabel terikat berupa parameter karakteristik *Marshall* yang meliputi: Stabilitas *Marshall*; *Flow*; *Void in Mix* (VIM); *Void in Mineral Aggregate* (VMA); *Void Filled with Bitumen* (VFB); *Marshall Quotient* (MQ).

Material Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian terdiri atas:

Agregat kasar dan agregat halus Agregat yang digunakan sebagai penyusun campuran AC-WC berasal dari Quarry Lolan, Kabupaten Bolaang Mongondow.

Aspal Bahan pengikat yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70. Filler alternatif Material substitusi filler yang digunakan berupa kombinasi: abu arang tempurung kelapa; abu sekam padi.

Kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi menggunakan rasio 1:1 pada setiap variasi substitusi filler. Seluruh material yang digunakan terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik material untuk memastikan kesesuaian dengan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018.

Tabel 1. Tabel karakteristik material

No	Jenis Filler	Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Satuan
1	Agregat kasar (Split 13–25 mm)	Berat jenis bulk	2,654	gr/cm ³
		Berat jenis apparent	2,639	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	10	%
2	Agregat kasar (Split 5–13 mm)	Berat jenis bulk	2,604	gr/cm ³
		Berat jenis apparent	2,666	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	34	%
3	Agregat halus (Abu batu)	Berat jenis bulk	2,446	gr/cm ³
		Berat jenis apparent	2,730	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	54	%
4	Filler (PC)	Berat jenis bulk	3,150	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	2	%
5	Filler (Abu Arang Tempurung Kelapa)	Berat jenis bulk	2,187	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	2	%
6	Filler (Abu Sekam Padi)	Berat jenis bulk	2,148	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	2	%
7	Filler (Kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi)	Berat jenis bulk	2,166	gr/cm ³
		Proporsi dalam campuran	2	%
8	Aspal Pen 60/70	Berat jenis aspal	1,030	gr/cm ³
		Kadar aspal optimum hasil mix design	6,50	%

Sumber: Data Hasil Pengujian Penulis

Rancangan Eksperimen

Perancangan campuran dilakukan berdasarkan metode campuran AC-WC sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018. Tahapan awal dilakukan dengan menentukan komposisi agregat dan kadar aspal optimum (KAO). Kadar Aspal Optimum (KAO) ditentukan

berdasarkan hasil perancangan campuran dan evaluasi karakteristik Marshall pada campuran AC-WC tanpa substitusi filler. Berdasarkan hasil pengujian pada variasi kadar aspal yang direncanakan, kadar aspal 6,50% dipilih sebagai KAO karena menghasilkan keseimbangan karakteristik Marshall yang memenuhi persyaratan campuran AC-WC, meliputi stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFB. Pemilihan kadar aspal 6,50% juga dimaksudkan untuk memperoleh kondisi campuran dasar yang memenuhi persyaratan sebelum dilakukan substitusi filler alternatif. Dengan menggunakan KAO yang sama pada seluruh variasi substitusi filler, perubahan nilai karakteristik Marshall dapat lebih terarah untuk menunjukkan pengaruh penggunaan kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai substitusi filler, sehingga pengaruh perubahan kadar aspal dapat diminimalkan. Total kebutuhan filler dalam campuran ditetapkan sebesar 2%.

Tabel 2. Komposisi Agregat dan Campuran AC-WC

Komposisi Agregat	Persentase (%)	Komposisi Campuran	Persentase (%)
BP 13–20	10	BP 13–20	9,35
BP 5–13	34	BP 5–13	31,79
Abu Batu 0–5	54	Abu Batu 0–5	50,49
PC	2	PC	1,87
Aspal	-	Aspal	6,5
Total Aggregate	100	Total Campuran	100,0

Sumber: Data Hasil Pengujian Penulis

Tabel 3. Parameter Pembuatan Campuran AC-WC

Parameter	Nilai
Jenis Campuran	Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)
Kadar Aspal Optimum (KAO)	6,50%
Temperatur Pencampuran	120 °C
Temperatur Pemadatan	150 °C
Jumlah Tumbukan Marshall	75 tumbukan setiap sisi (75 × 2)
Jumlah Benda Uji	15 benda uji

Sumber: Data Hasil Pengujian Penulis

Variasi substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi yang digunakan terdiri dari:

Tabel 4. Variasi Substitusi Filler pada Campuran AC-WC

Variasi (%)	Komposisi (gr)	Abu Arang Tempurung Kelapa (gr)	Abu Sekam Padi (gr)	Semen (gr)	Total Komposisi (%)
0	24	-	-	24	2
25	24	3	3	18	2
50	24	6	6	12	2
75	24	9	9	6	2
100	24	12	12	-	2

Sumber: Data Hasil Pengujian Penulis

Setiap variasi campuran dibuat sebanyak 3 benda uji, sehingga total benda uji yang digunakan sebanyak: 5 variasi×3 benda uji=15 benda uji.

Standar Pengujian Material

Tabel 5. Standar Pengujian Material

Jenis Pengujian	Standar Pengujian
Berat jenis agregat kasar dan halus	SNI 1969 dan SNI 1970
Berat jenis aspal	SNI 2441
Analisis saringan agregat/filler	SNI ASTM C136
Berat jenis filler	SNI 03-4804
Pengujian Marshall	SNI 06-2489
Spesifikasi campuran AC-WC	Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018

Sumber: Data Hasil Pengujian Penulis

Prosedur Penelitian

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mempersiapkan seluruh material penyusun campuran, yaitu agregat, aspal penetrasi 60/70, abu arang tempurung kelapa, dan abu sekam padi. Material filler alternatif dipersiapkan dengan mencampurkan abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi menggunakan perbandingan 1:1 sesuai rancangan penelitian. Abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi terlebih dahulu dikeringkan menggunakan oven hingga mencapai kondisi kering. Material kemudian dihancurkan menggunakan mortar dan alu hingga menjadi butiran halus, kemudian disaring menggunakan saringan No.200 (0,075 mm), lalu dimasukan kedalam oven sampai mencapai suhu 130° kemudian di timbang, setelah itu akan dicampur dengan agregat dan aspal dan dipanaskan lagi sampai mencapai suhu 150°, setelah tercampur dengan agregat dan aspal akan masuk kedalam mould, setelah dimasukan kedalam mould ditumbuk sebanyak 75x2. Pengujian karakteristik filler meliputi berat jenis dan kadar air sebelum digunakan sebagai bahan substitusi filler.

Pengujian karakteristik material dilakukan terhadap agregat, aspal, dan filler untuk memperoleh parameter teknis material yang digunakan dalam campuran. Hasil pengujian material digunakan sebagai dasar dalam proses perancangan campuran AC-WC.

Setelah material memenuhi persyaratan, dilakukan perancangan campuran (*Job Mix Formula/JMF*) untuk memperoleh komposisi agregat dan kadar aspal yang sesuai. Tahapan ini bertujuan mendapatkan campuran AC-WC yang memenuhi persyaratan teknis sebelum dilakukan substitusi filler alternatif.

Pengujian Marshall dilakukan untuk memperoleh karakteristik mekanis dan volumetrik campuran. Parameter yang diperoleh meliputi:

Stabilitas, yaitu kemampuan campuran menerima beban maksimum;

Flow, yaitu deformasi yang terjadi pada saat pembebanan maksimum;

VIM, yaitu persentase rongga udara dalam campuran;

VMA, yaitu rongga antar agregat mineral;

VFB, yaitu persentase rongga agregat yang terisi aspal;

MQ, yaitu perbandingan nilai stabilitas terhadap flow.

Analisis Data

Data hasil pengujian Marshall dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan membandingkan perubahan nilai parameter Marshall pada setiap variasi substitusi filler. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi hubungan antara persentase substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi terhadap perubahan:

nilai stabilitas;
 nilai flow;
 karakteristik volumetrik (VIM, VMA, VFB);
 nilai Marshall Quotient. Menggunakan rumus:

$$\text{Marshall Quotient} = \text{Stabilitas/Flow}$$

Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan kriteria penerimaan campuran AC-WC berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 untuk menentukan kesesuaian karakteristik campuran yang dihasilkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pembahasan menyajikan temuan penelitian utama secara sistematis melalui tabel, grafik, atau ilustrasi yang relevan, diikuti dengan analisis dan interpretasi ilmiah yang mengaitkan hasil dengan tujuan penelitian, teori, dan penelitian terdahulu. Pembahasan menekankan makna ilmiah, keunggulan dan keterbatasan hasil, faktor yang memengaruhi, serta implikasi dan potensi pengembangan, disusun secara objektif, analitis, dan terintegrasi tanpa pengulangan metode.

Hasil Pengujian Karakteristik Marshall

Gambar Pengujian karakteristik Marshall dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat mekanis dan volumetrik campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) akibat substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai filler. Variasi substitusi filler yang digunakan terdiri atas 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dengan jumlah benda uji sebanyak tiga benda uji pada setiap variasi. Parameter Marshall yang dianalisis meliputi stabilitas, *flow*, *Void in Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled with Bitumen* (VFB), dan *Marshall Quotient* (MQ). Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-WC dengan Variasi Substitusi Filler

Variasi Filler	Benda Uji	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	MQ (kg/mm)
0%	1	1373,55	2,54	5,12	14,23	76,28	540,77
	2	1448,12	2,79	5,01	15,81	79,77	518,30
	3	1396,10	2,54	4,99	15,16	82,00	549,24
	Rata-rata	1405,92	2,62	5,040	15,07	79,35	536,24
25%	1	1410,3	3,78	4,23	17,2	75,4	373,1
	2	1425,8	3,86	4,16	17,1	75,9	369,38
	3	1430,23	3,88	4,14	17,12	75,71	368,62
	Rata-rata	1422,11	3,84	4,177	17,14	75,63	370,36
50%	1	1535,4	3,6	3,75	16,8	77,68	426,5
	2	1548,2	3,68	3,65	16,7	78,14	420,71
	3	1555,6	3,7	3,68	16,66	77,91	420,43
	Rata-rata	1546,40	3,66	3,693	16,72	77,91	422,55
75%	1	1590,5	3,52	3,21	16,3	80,31	451,85
	2	1602,4	3,6	3,12	16,2	80,74	445,11
	3	1612,11	3,65	3,1	16,25	80,92	441,67
	Rata-rata	1601,67	3,59	3,143	16,25	80,66	446,21
100%	1	1628,5	3,22	3,1	16,2	81,2	505,75
	2	1640,7	3,3	3,02	16,1	81,6	497,18

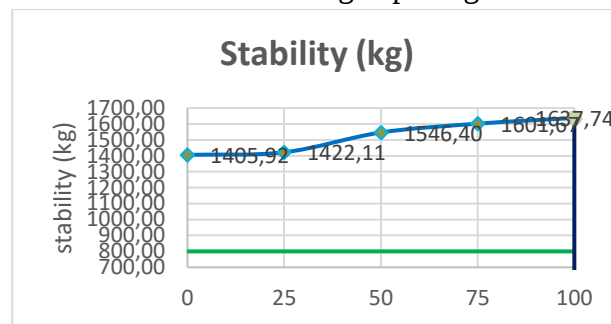
3	1644,02	3,38	2,99	16,15	81,46	486,4
Rata-rata	1637,74	3,30	3,037	16,15	81,20	496,44
SPEC	≥800 kg	2–4 mm	3,0–5,0%	≥15%	≥65%	≥250 kg/mm

Sumber: Data Hasil Pengujian Penulis

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi menunjukkan adanya perubahan terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Secara umum, peningkatan persentase substitusi filler menunjukkan kecenderungan peningkatan stabilitas dan Marshall Quotient, sedangkan nilai *flow*, VIM, dan VMA mengalami penurunan.

Pengaruh Substitusi Filler terhadap Stabilitas Marshall

Stabilitas Marshall menunjukkan kemampuan campuran beraspal dalam menerima beban maksimum sebelum mengalami keruntuhan. Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan persentase substitusi filler memberikan kecenderungan peningkatan nilai stabilitas.



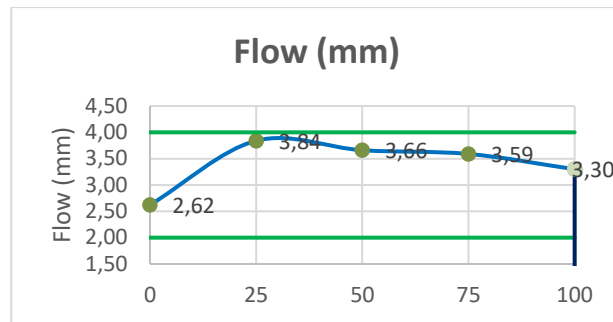
Gambar 2. Grafik Stabilitas

Sumber: Data Hasil pengujian Penulis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan variasi substitusi campuran menyebabkan kecenderungan peningkatan nilai stabilitas Marshall. Campuran kontrol (0%) memiliki nilai stabilitas sebesar 1405,92 kg, kemudian meningkat menjadi 1422,11 kg pada variasi 25%. Selanjutnya, nilai stabilitas pada variasi 50%, 75%, dan 100% masing-masing sebesar 1.546,40 kg, 1.601,67 kg, dan 1637,74 kg. Peningkatan nilai stabilitas menunjukkan bahwa penambahan material campuran mampu menghasilkan struktur campuran yang lebih kuat akibat meningkatnya interlocking antar agregat dan ikatan adhesi antara aspal dengan agregat. Kondisi tersebut menyebabkan campuran menjadi lebih padat dan memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan beban tekan. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, seluruh variasi campuran telah memenuhi persyaratan nilai stabilitas minimum AC-WC yaitu 800 kg. Namun, peningkatan stabilitas tetap perlu dianalisis bersama parameter Marshall lainnya untuk memastikan keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan deformasi campuran.

Pengaruh Substitusi Filler terhadap Nilai Flow

Rumus Nilai *flow* menunjukkan deformasi plastis yang terjadi pada campuran ketika menerima beban maksimum pada pengujian Marshall.



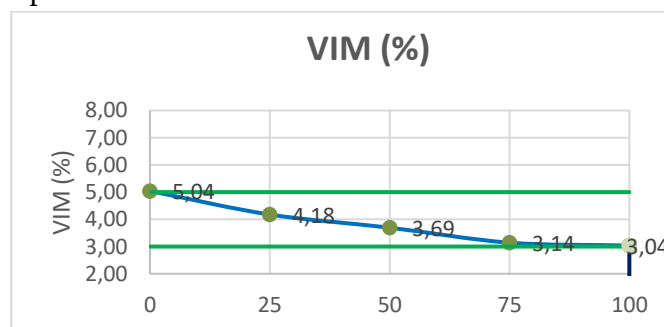
Gambar 3. Grafik Flow

Sumber: Data Penulis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan variasi substitusi campuran menyebabkan nilai flow mengalami perubahan yang cenderung menurun setelah mencapai nilai tertinggi pada variasi 25%. Campuran kontrol (0%) memiliki nilai *flow* sebesar 2,62 mm, kemudian meningkat menjadi 3,84 mm pada variasi 25%. Selanjutnya, nilai *flow* pada variasi 50%, 75%, dan 100% masing-masing sebesar 3,66 mm, 3,59 mm, dan 3,30 mm. Peningkatan nilai *flow* pada variasi awal menunjukkan bahwa penambahan material mampu meningkatkan kemampuan deformasi campuran, sedangkan penurunan nilai *flow* pada variasi lebih tinggi mengindikasikan campuran menjadi lebih kaku akibat meningkatnya kepadatan dan pengisian rongga oleh partikel material. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* campuran AC-WC berada pada rentang persyaratan 2–4 mm, sehingga seluruh variasi campuran masih memenuhi standar yang ditetapkan. Nilai *flow* perlu dianalisis bersama stabilitas untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan campuran dan kemampuan menahan deformasi sebelum mengalami kerusakan.

Pengaruh Substitusi Filler terhadap Nilai Void in Mix (VIM)

Void in Mix (VIM) menunjukkan persentase rongga udara yang terdapat dalam campuran setelah proses pemadatan.



Gambar 4. Grafik VIM

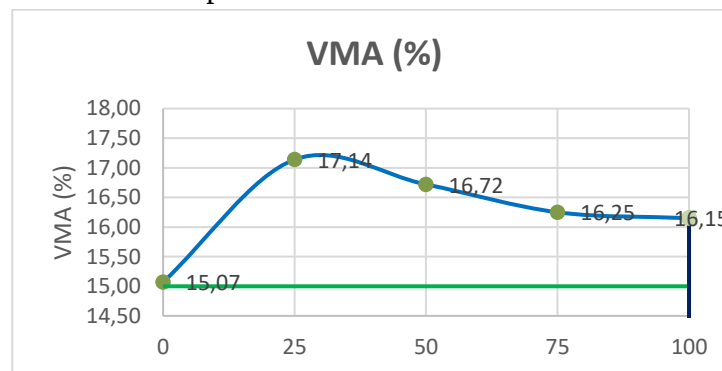
Sumber: Data Hasil pengujian Penulis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan variasi substitusi campuran menyebabkan nilai VIM (Void in Mix) mengalami kecenderungan penurunan. Campuran kontrol (0%) memiliki nilai VIM sebesar 5,04%, kemudian menurun menjadi 4,17% pada variasi 25%. Selanjutnya, nilai VIM pada variasi 50%, 75%, dan 100% masing-masing sebesar 3,69%, 3,14%, dan 3,03%. Penurunan nilai VIM menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan

material campuran mampu mengurangi jumlah rongga udara dalam campuran. Kondisi ini diduga terjadi akibat partikel material yang lebih banyak mengisi rongga antar agregat sehingga menghasilkan campuran yang lebih padat. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai VIM untuk campuran AC-WC disyaratkan berada pada rentang 3–5%, sehingga seluruh variasi campuran masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Nilai VIM yang terlalu rendah perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan berkurangnya ruang untuk ekspansi aspal, sedangkan nilai VIM yang terlalu tinggi dapat meningkatkan potensi masuknya air dan mempercepat kerusakan campuran.

Pengaruh Substitusi Filler terhadap Nilai VMA

Nilai Void in Mineral Aggregate (VMA) menggambarkan volume rongga yang terdapat di antara agregat mineral dalam campuran.



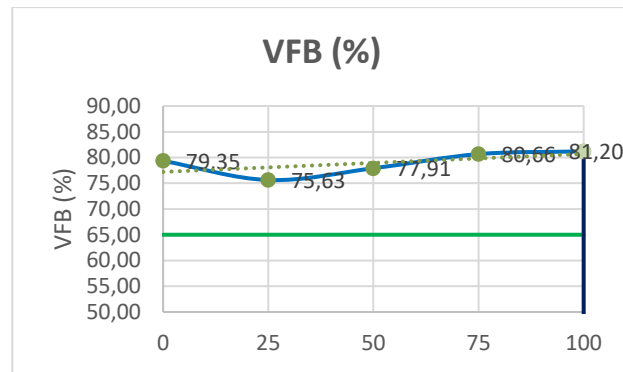
Gambar 5. Grafik VMA

Sumber: Data Hasil pengujian Penulis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan variasi substitusi campuran menyebabkan nilai VMA (Void in Mineral Aggregate) mengalami perubahan dengan kecenderungan meningkat pada variasi awal kemudian menurun pada variasi berikutnya. Campuran kontrol (0%) memiliki nilai VMA sebesar 15,07%, kemudian meningkat menjadi 17,14% pada variasi 25%. Selanjutnya, nilai VMA pada variasi 50%, 75%, dan 100% masing-masing sebesar 16,72%, 16,25%, dan 16,15%. Peningkatan nilai VMA menunjukkan adanya perubahan susunan rongga antar agregat yang tersedia untuk menampung aspal efektif. Penurunan nilai VMA pada variasi lebih tinggi diduga akibat semakin padatnya susunan agregat dan meningkatnya kemampuan partikel dalam mengisi rongga campuran. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai minimum VMA untuk campuran AC-WC adalah 15%, sehingga seluruh variasi campuran telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Nilai VMA yang sesuai menunjukkan bahwa campuran memiliki ruang rongga yang cukup untuk mempertahankan lapisan aspal efektif sehingga *dapat mendukung kinerja campuran terhadap beban lalu lintas*.

Pengaruh Substitusi Filler terhadap Nilai VFB

Void Filled with Bitumen (VFB) menunjukkan persentase rongga dalam agregat mineral yang terisi oleh aspal efektif.



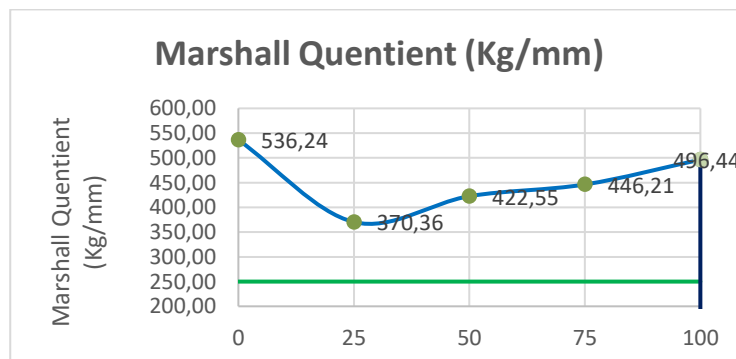
Gambar 6. Grafik VFB

Sumber: Data Hasil pengujian Penulis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan variasi substitusi campuran menyebabkan nilai VFB (Void Filled with Bitumen) mengalami perubahan yang fluktuatif namun cenderung meningkat pada variasi akhir. Campuran kontrol (0%) memiliki nilai VFB sebesar 79,35%, kemudian menurun menjadi 75,63% pada variasi 25%. Selanjutnya, nilai VFB pada variasi 50%, 75%, dan 100% masing-masing sebesar 77,91%, 80,66%, dan 81,20%. Peningkatan nilai VFB menunjukkan bahwa semakin besar penggunaan material campuran menyebabkan rongga dalam agregat yang terisi aspal semakin meningkat. Kondisi ini menunjukkan kemampuan aspal dalam mengisi ruang kosong antar agregat menjadi lebih baik sehingga menghasilkan campuran yang lebih kedap dan memiliki ikatan antar material yang lebih kuat. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai VFB campuran AC-WC disyaratkan berada pada rentang 65–75%, sehingga hasil pengujian pada seluruh variasi berada di atas batas minimum persyaratan. Nilai VFB yang terlalu tinggi perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu kaya aspal dan berpotensi mengalami deformasi plastis, sehingga perlu dianalisis bersama parameter Marshall lainnya seperti stabilitas dan flow untuk menentukan komposisi optimum.

Pengaruh Substitusi Filler terhadap Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient merupakan parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan campuran berdasarkan rasio antara stabilitas dan *flow*.



Gambar 7. Grafik Marshall Quotient

Sumber: Data Hasil pengujian Penulis

Berdasarkan hasil pengujian, nilai Marshall Quotient (MQ) mengalami perubahan yang fluktuatif pada setiap variasi substitusi campuran. Nilai MQ pada variasi 0% sebesar 536,24

kg/mm, kemudian mengalami penurunan menjadi 370,36 kg/mm pada variasi 25%. Selanjutnya, nilai MQ kembali meningkat pada variasi 50%, 75%, dan 100% dengan nilai masing-masing sebesar 422,55 kg/mm, 446,21 kg/mm, dan 496,44 kg/mm. Penurunan nilai MQ pada variasi 25% menunjukkan bahwa campuran mengalami peningkatan kemampuan deformasi akibat penurunan tingkat kekakuan campuran. Namun, peningkatan nilai MQ pada variasi berikutnya menunjukkan adanya peningkatan kekakuan campuran yang dipengaruhi oleh kenaikan nilai stabilitas dan kecenderungan penurunan nilai *flow*. Variasi substitusi 100% menghasilkan nilai MQ tertinggi dibandingkan variasi lainnya, yang menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas. Berdasarkan hasil pengujian parameter Marshall secara keseluruhan, peningkatan nilai MQ pada variasi 100% menunjukkan bahwa penggunaan substitusi filler mampu memperbaiki karakteristik mekanis campuran AC-WC. Nilai MQ sebesar 496,44 kg/mm menunjukkan keseimbangan antara kemampuan menahan beban dan fleksibilitas campuran karena diperoleh dari hubungan antara nilai stabilitas dan *flow*. Meskipun demikian, nilai MQ tidak dapat dijadikan sebagai parameter tunggal dalam menentukan kualitas campuran, sehingga perlu dievaluasi bersama parameter Marshall lainnya seperti stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFB untuk memperoleh komposisi campuran yang optimum.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai *filler* pada campuran *Asphalt Concrete–Wearing Course* (AC-WC), maka dapat disimpulkan sebagai berikut: 1) Substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai *filler* memberikan pengaruh terhadap nilai stabilitas Marshall campuran AC-WC. Peningkatan persentase substitusi *filler* menunjukkan kecenderungan peningkatan nilai stabilitas. Nilai stabilitas meningkat dari 1405,92 kg pada variasi substitusi 0% menjadi 1637,74 kg pada variasi substitusi 100%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi mampu meningkatkan kemampuan campuran dalam menerima beban akibat adanya pengisian rongga yang lebih baik dan peningkatan ikatan antar material penyusun campuran. 2) Substitusi kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi juga memengaruhi parameter Marshall lainnya, yaitu *flow*, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient (MQ). Nilai *flow* mengalami perubahan dari 2,62 mm pada variasi 0% menjadi 3,30 mm pada variasi 100%, dengan seluruh variasi masih memenuhi persyaratan campuran AC-WC. Nilai VIM mengalami penurunan dari 5,040% menjadi 3,037%, yang menunjukkan bahwa peningkatan substitusi *filler* menyebabkan campuran menjadi lebih padat. Nilai VMA mengalami perubahan dari 15,07% menjadi 16,15%, sedangkan nilai VFB meningkat dari 79,35% menjadi 81,20%. Selain itu, nilai Marshall Quotient (MQ) mengalami peningkatan pada variasi substitusi tinggi dan mencapai nilai 496,44 kg/mm pada substitusi 100%, yang menunjukkan peningkatan kekakuan campuran dalam menahan deformasi.

Secara keseluruhan, substitusi 100% kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi menghasilkan karakteristik Marshall tertinggi dibandingkan variasi lainnya dan menunjukkan potensi sebagai material alternatif *filler* pada campuran AC-WC berdasarkan evaluasi karakteristik Marshall. Namun, evaluasi lanjutan terkait ketahanan campuran terhadap

pengaruh lingkungan, durabilitas, dan kinerja deformasi diperlukan untuk memperluas pemahaman mengenai penggunaan *filler* alternatif tersebut pada campuran beraspal. Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar penelitian lanjutan mengkaji durabilitas, ketahanan air, dan deformasi permanen campuran dengan substitusi 100% untuk memastikan kinerja jangka panjang. Praktisi konstruksi jalan disarankan mempertimbangkan penggunaan kombinasi abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai *filler* alternatif, khususnya pada campuran AC-WC, dengan tetap memperhatikan hasil pengujian lapangan. Pemerintah dan regulator disarankan meninjau kemungkinan memasukkan material limbah biomassa ke dalam spesifikasi teknis campuran beraspal. Pengelola limbah biomassa juga disarankan mengembangkan pemanfaatan abu arang tempurung kelapa dan abu sekam padi sebagai produk bernilai tambah.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Berlian S.O Kawung: konseptualisasi penelitian, perancangan metodologi, pelaksanaan eksperimen, pengumpulan data, analisis data, penyusunan manuskrip, dan revisi manuskrip. Rilya Rumbayan dan Don Radius Gerald Kabo: supervisi penelitian, validasi hasil penelitian, pemberian masukan ilmiah, serta peninjauan dan revisi manuskrip. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir manuskrip.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa, memperbaiki tata bahasa, dan menyempurnakan struktur penulisan. AI generatif tidak digunakan untuk menghasilkan, memanipulasi, atau menganalisis data penelitian. Seluruh isi manuskrip telah ditinjau dan diverifikasi oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas keakuratan, integritas, dan isi akhir manuskrip.

REFERENSI

- American Society for Testing and Materials. (2022). ASTM D6927: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Arabani, M., & Tahami, S. A. (2015). Assessment of rice husk ash as a silicate modifier in asphalt binder. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 620–630. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.044>
- Badan Standardisasi Nasional. (2018). SNI 2489:2018 Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kusbiantoro. (2023). Analisis filler alternatif pada campuran beraspal. *Jurnal MUSTEK Anim Ha*, 13(1), 1–5. <https://doi.org/10.35724/mustek.v13i01.5959>
- Mistry, R., & Roy, T. K. (2016). Alternative fillers in asphalt mixture: A review. *Construction and Building Materials*, 104, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.037>
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of coal waste powder on the performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 66, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.078>
- Partl, M. N., et al. (2013). *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*. Berlin: Springer.
- Ramadhani, R., Jimmyanto, H., & Aminuddin, K. M. (2026). Analisis karakteristik Marshall dan penentuan kadar aspal optimum pada campuran AC-WC dengan substitusi 50% filler menggunakan abu sekam padi dan abu tempurung kelapa. *Jurnal Deformasi*, 11(1), 18–28. <https://doi.org/10.31851/deformasi.v11i1.21497>
- Roque, R., & Buttlar, W. G. (1992). The development of a measurement and analysis system to assess permanent deformation potential in asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1351, 109–117.
- Valentin, J., Trejbal, J., Nežerka, V., Valentová, T., & Faltus, M. (2021). Characterization of quarry dusts and industrial by-products as potential substitutes for traditional fillers and their impact on water susceptibility of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 301, 124294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124294>
- Zhang, Y., et al. (2021). Asphalt-filler interaction mechanism and its influence on asphalt mixture performance: A review. *Construction and Building Materials*, 297, 123844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123844>