

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

KINERJA CAMPURAN AC-WC MENGGUNAKAN LIMBAH BETON ASPAL DI LABORATORIUM DENGAN PEREMAJA BIOASPAL TEMPURUNG KELAPA

Muhammad Anggi¹, Ridha Dzahabiyah¹, Atmy Verani Rouly Sihombing^{1*}

^{1*)} Program Studi Teknik Konstruksi Sipil, Politeknik Negeri Bandung

Email Penulis Korespondensi: atmyvera@polban.ac.id

Nomor HP Penulis Korespondensi: 0895360932682

ABSTRACT

Asphalt concrete waste in the Materials Laboratory of the Civil Engineering Department at Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) reaches approximately 326 kg per year, potentially causing environmental impacts if not managed properly. This research aims to recycle asphalt concrete waste at high contents (50% and 75% of the total asphalt mixture weight) using coconut shell bio-asphalt as a rejuvenator in Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixtures. These recycled mixtures are intended to be reused as patching materials for road damage within the POLBAN campus. The three mixtures were evaluated using the Marshall method, focusing on determining the optimum asphalt content (OAC), stability, flow, Marshall quotient (MQ), voids in the mix (VIM), immersion index (II), voids in mineral aggregate (VMA), and voids filled with asphalt (VFA). The results showed that the mixture containing 50% asphalt concrete waste with 8.0% bio-asphalt (by asphalt weight) produced an OAC of 5.0%, a stability of 1603.3 kg, a flow of 4.0 mm, and an MQ of 396.9 kg/mm. Meanwhile, the mixture with 75% asphalt concrete waste and 8.0% bio-asphalt achieved an OAC of 4.7%, a stability of 973.8 kg, a flow of 3.8 mm, and an MQ of 255.9 kg/mm. Both mixtures met the 2018 Bina Marga Revision 2 specifications for AC-WC layers. Based on these results, it can be concluded that asphalt mixtures in the POLBAN materials laboratory can be reused as hot mix AC-WC mixtures up to a 75% waste content. This research demonstrates the potential for utilizing asphalt concrete waste as patching material for campus roads at POLBAN.

Keywords: AC-WC, Asphalt concrete waste, Coconut shell bio-asphalt, Marshall test.

1. PENDAHULUAN

Laboratorium Bahan Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) menghasilkan sekitar 326 kg limbah beton aspal setiap tahun. Jika tidak dikelola, limbah ini dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Selama ini, pemanfaatan kembali limbah perkerasan jalan seperti Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) umumnya masih Di sisi lain, kampus POLBAN memiliki kebutuhan tambalan jalan (patching) yang cukup tinggi akibat kerusakan permukaan. Berdasarkan evaluasi Unit Penunjang Akademik – Pemeliharaan dan Perawatan (UPA-PP), diperlukan solusi praktis dan ramah lingkungan.

Penelitian ini bertujuan mengolah limbah beton aspal dari laboratorium dengan kadar tinggi (50% dan 75%), terbatas pada kadar 30%, seperti ditunjukkan dalam penelitian Sihombing (2018, 2020) yang menggunakan bioaspal tempurung kelapa sebagai peremaja. Agar limbah beton aspal dapat digunakan kembali sesuai spesifikasi, diperlukan peningkatan kualitas material melalui penambahan bahan peremaja, salah satunya bioaspal tempurung kelapa yang dicampurkan secara kering (dry mixing). Menggunakan bioaspal tempurung kelapa sebagai bahan peremaja dalam campuran Laston Lapis Aus (AC-WC). Hasilnya diharapkan menjadi alternatif bahan tambalan jalan di lingkungan kampus serta

mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui karakteristik campuran beraspal AC-WC dengan aspal dan agregat baru, mengetahui karakteristik campuran beraspal yang menggunakan limbah beton aspal di laboratorium dengan kadar tinggi serta bioaspal tempurung kelapa sebagai bahan peremaja, serta membandingkan kedua jenis campuran tersebut.

2. METODOLOGI

Berikut adalah paragraf penjelas singkat yang merangkum dan menjelaskan ke-6 poin utama dalam tahapan metodologi penelitian ini.

1. Perencanaan Awal

Studi literatur dilakukan untuk mengkaji teori dan penelitian terdahulu terkait pemanfaatan limbah beton aspal (AC-WC) dan penggunaan bioaspal tempurung kelapa sebagai bahan peremaja. Selanjutnya menyusun rencana kerja serta menentukan alat dan bahan yang dibutuhkan.

2. Persiapan dan Pengujian Awal

Pengujian bahan dilakukan terhadap limbah campuran AC-WC (melalui proses ekstraksi untuk memisahkan aspal dan agregat), bioaspal tempurung kelapa (pengujian karakteristik dan potensi peremaja), agregat baru dan aspal baru (uji kualitas sesuai spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Apabila material tidak memenuhi spesifikasi, dilakukan penggantian dengan material baru.

3. Perancangan Tahap I

Penyusunan rancangan campuran beraspal AC-WC control, Penentuan kadar aspal optimum (KAO) berdasarkan spesifikasi bina marga jalan dan jembatan tahun 2018, rev 2.

4. Perancangan Tahap II

Perancangan campuran AC-WC menggunakan limbah beton aspal (50% dan 75%) serta bioaspal tempurung kelapa sebagai peremaja, dan evaluasi kelayakan campuran terhadap spesifikasi. Bila sesuai, dilakukan penentuan KAO campuran modifikasi.

5. Pengujian Kinerja Pendekatan Marshall

evaluasi campuran dilakukan dengan metode marshall, mencakup parameter: Stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, VFA, dan Indeks Perendaman. Campuran yang diuji meliputi: AC-WC control, AC-WC + limbah 50% + bioaspal tempurung kelapa, AC-WC + limbah 75% + bioaspal tempurung kelapa.

3. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Material

Pengujian Material ini berfungsi untuk mengetahui sifat-sifat yang terkandung dalam material yang akan digunakan termasuk Agregat Kasar, Agregat Halus dan Aspal yang harus sesuai dengan peraturan SNI atau ASTM. Pada Tabel 11 Yang berisikan jenis pengujian yang digunakan sebagai acuan pengujian agregat kasar pada penelitian ini.

3.1.1 Hasil Pengujian Agregat Kasar

Agregat baru yang digunakan dalam penelitian ini merupakan batuan andesit yang diperoleh dari PT. Anten Asri, berlokasi di Batujajar, Jawa Barat. Mengacu pada Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2, agregat kasar didefinisikan sebagai butiran material yang tertahan pada saringan No. 4 atau berukuran lebih dari 2,36 mm. Karakteristik dari agregat kasar yang telah melalui pengujian dan digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
1.	Abrasi menggunakan mesin Los Angeles	SNI 03 2417-1991	%	17,87%	Maks. 40%
2.	Kadar lumpur agregat kasar	Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2010 Revisi 3	%	1,91%	Maks. 2%

No.	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
3.	Berat Jenis Bulk			2,5	>2,5
4.	Berat Jenis SSD			2,6	Perbedaan berat jenis
5.	Berat Jenis <i>Apparent</i>	SNI 03-1969-1990		2,7	agregat kasar dan
6.	Penyerapan Air		%	2,2	agregat halus <0,2
7.	Kuat Tekan pada 400kN	BS 812-110-1990	%	20,05%	<30%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1 dan mengacu pada SNI, BS, serta Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, agregat kasar dari PT. Anten Asri memenuhi standar yang ditetapkan dan layak digunakan dalam penelitian ini.

3.1.2 Hasil pengujian Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan berasal dari PT. Anten Asri, Batujajar—sumber yang sama dengan agregat kasar. Material ini lolos saringan No. 4 ($\leq 2,36$ mm). Hasil pengujiannya tercantum pada Tabel 16 dan memenuhi syarat untuk digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
1.	Berat Jenis Bulk			2,50	> 2,5
2.	Berat Jenis SSD			2,57	
3.	Berat Jenis <i>Apparent</i>	SNI 03-1970-1990		2,69	Perbedaan berat jenis agregat kasar dan agregat halus < 0,2
4.	Penyerapan Air		%	2,90	
5.	Kadar Organik	SNI 03-2816-1992		No. 1	Maks. No. 1
6.	Kadar Lumpur Agregat Halus	SNI 03-4142-1996	%	1,24%	Maks. 10%
7.	Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	%	67,9%	Min. 50%

Berdasarkan Tabel 2 dan acuan SNI, agregat halus dari PT. Anten Asri memenuhi syarat dan layak digunakan dalam penelitian ini.

3.1.3 Hasil Pengujian Aspal Kontrol

Aspal baru yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 dari PT. Pertamina. Hasil uji pada Tabel 3 menunjukkan bahwa aspal ini memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Aspal

No	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
1.	Penetrasi pada 25°C, 100 gr, 5 Detik	SNI 2456:2011	0,1 mm	64,21	60-70
2.	Viskositas Kinematis 135°C	ASTM D2170-10	cSt	478,33	≥ 300
3.	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	°C	50	≥ 48
4.	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432:2011	Cm	>100	≥ 100
5.	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	°C	340	≥ 232
6.	Kelarutan dalam TCE (%)	AASHTO T44-14	%	99,86	≥ 99
7.	Berat Jenis	SNI 2441:2011		1,034	≥ 1,0

3.1.4 Hasil Pengujian Material Hasil Ekstraksi pada Limbah Beton Aspal

Limbah beton aspal yang digunakan berasal dari sisa praktikum dan penelitian di Laboratorium Uji Bahan POLBAN. Hasil pengujian aspal dan agregat dari ekstraksi limbah disajikan pada Tabel 21 dan Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Pengujian Aspal Limbah

No	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
1.	Ekstraksi untuk mendapatkan kadar aspal	SNI 03-3640-1994	%	5,5	
2.	Penetrasi pada 25°C, 100 gr, 5 Detik	SNI 2456:2011	0,1 mm	39	60-70
3.	Viskositas Kinematis 135°C	ASTM D2170-10	cSt	486,75	≥ 300
4.	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	°C	67	≥ 48
5.	Berat Jenis	SNI 2441:2011		1,040	≥ 1,0

Berdasarkan Tabel 4, kadar aspal limbah di laboratorium adalah 5,5%. Hasil uji menunjukkan bahwa nilai penetrasinya tidak memenuhi SNI dan ASTM, sehingga digunakan bioaspal tempurung kelapa sebagai peremaja. Sementara itu, parameter lain seperti berat jenis, titik lembek, dan viskositas memenuhi standar, sehingga aspal limbah tetap dapat digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Limbah

No	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
1.	Berat Jenis Bulk	SNI 03-1970-1990		2,50	> 2,5
2.	Berat Jenis SSD			2,70	Perbedaan berat jenis

No	Jenis Pengujian	Standar Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian	Nilai
3.	Berat Jenis <i>Apparent</i>			2,60	agregat
4.	Penyerapan Air		%	2,0	kasar dan agregat halus < 0,2

2.1.5 Rekapitulasi Hasil Pengujian Bioaspal

Bioaspal yang digunakan berasal dari tempurung kelapa produksi PT. Nuciferra, Bantul, Yogyakarta. Rekap hasil pengujiannya (Sihombing, 2020) ditampilkan pada Tabel 5.

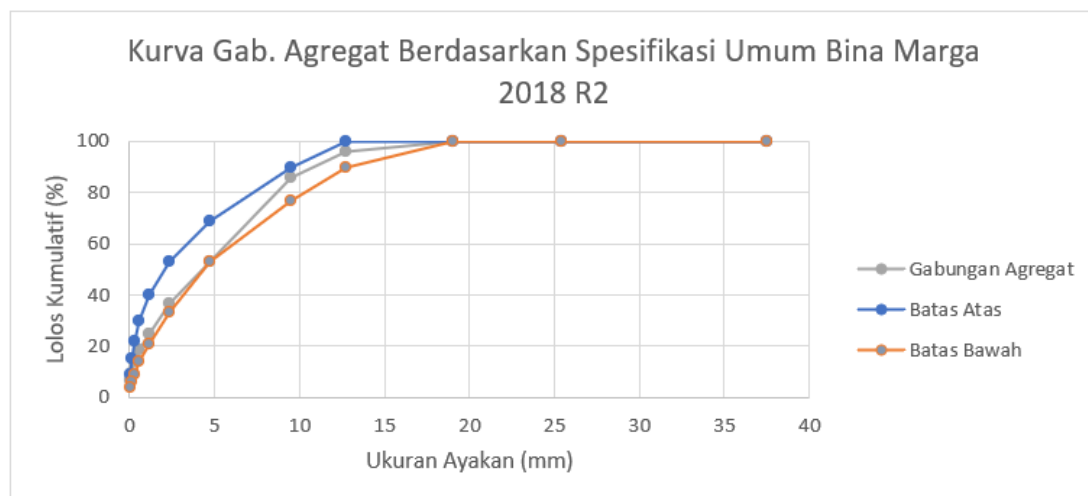
Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Bioaspal Tempurung Kelapa

No	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian
1.	Viskositas 60°C	Cps	<100
2.	Titik Bakar	°C	195
3.	Berat Jenis	Kg/L	1,008
4.	Kadar Air	%	10-20
5.	Ciri-ciri Fisik		Hitam Kecoklatan

3.2 Karakteristik Pendekatan *Marshall*

3.2.1 Rancangan Gradasi Proporsi Agregat AC-WC Kontrol

Gradasi campuran AC-WC kontrol dirancang mengacu pada Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018. Kurva gradasi agregat ditampilkan pada Gambar 1, dan proporsi agregatnya pada Tabel 6. Tujuan perancangan ini adalah mencapai keseimbangan antara stabilitas, durabilitas, dan fleksibilitas campuran. Dengan mengikuti batasan spesifikasi, kurva gradasi diharapkan tetap dalam toleransi yang disyaratkan, sehingga menunjang kinerja lapis permukaan jalan. Proporsi agregat disusun untuk memastikan distribusi ukuran partikel yang merata, yang memengaruhi kepadatan, rongga udara, dan daya ikat antar partikel dalam campuran.



Gambar 1. Kurva Gradasi Agregat AC-WC Kontrol

Berdasarkan kurva gradasi pada Gambar 9, proporsi agregat terdiri dari Split 7,3%, Screen 34,9%, Abu Batu 54,8%, dan Filler 3% dari total berat campuran. Nilai tengah kurva gradasi berada di antara batas atas dan bawah yang ditetapkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 6. Rancangan Kurva Gradasi Agregat AC-WC Kontrol

Nomor Ukuran Saringan (mm)	Spesifikasi Gradasi Laston (AC-WC)		Nilai Tengah Gradasi (Gradasi Rencana) (%)
	Batas Bawah	Batas Atas	
37,5	100	100	100
25,4	100	100	100
19	100	100	100
12,7	90	100	95,9
9,5	77	90	85,5
4,75	53	69	53,2
2,36	53	53	36,8
1,18	21	40	25,0
0,6	14	30	18,3
0,3	9	22	14,0
0,015	6	15	9,7
0,075	4	9	6,7

3.2.2 Metode Pencampuran dan Metode Pemadatan

Untuk campuran AC-WC kontrol, aspal dan agregat dipanaskan sesuai suhu rencana berdasarkan hasil uji viskositas. Setelah mencapai temperatur pencampuran, aspal ditambahkan ke agregat dan diaduk hingga homogen.

Pada campuran AC-WC + RAP + BTK, limbah beton aspal terlebih dahulu dipanaskan, lalu dicampur dengan bioaspal tempurung kelapa (BTK) hingga merata. Selanjutnya, agregat ditambahkan dan diaduk hingga homogen, lalu ditambahkan aspal sesuai kadar yang ditentukan dan dicampur kembali hingga merata pada suhu pencampuran.

Setelah mencapai suhu pemadatan, campuran dipadatkan menggunakan alat Marshall otomatis dengan 75 tumbukan pada masing-masing sisi, sesuai metode Marshall (SNI 06-2489-1991).

3.2.3 Karakteristik Pendekatan *Marshall*

Hasil pada perhitungan kadar aspal rencana (Pb) didapat nilai 5,4%. Oleh karena itu pada penelitian ini dibuat 7 persentase campuran aspal, yaitu 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 7%. Hasil pengujian karakteristik *marshall* pada masing-masing kadar aspal tertuang pada Tabel 7. Resume pengujian karakteristik pendekatan *marshall* Campuran AC-WC Kontrol.

Hasil pengujian karakteristik Marshall untuk masing-masing kadar aspal disajikan pada Tabel 7. Parameter yang diuji meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, VFA, dan Indeks Perendaman. Data ini digunakan untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) dan mengevaluasi keseimbangan antara stabilitas, durabilitas, dan fleksibilitas pada campuran AC-WC kontrol.

Tabel 7. Resume pengujian karakteristik pendekatan marshall AC-WC Kontrol

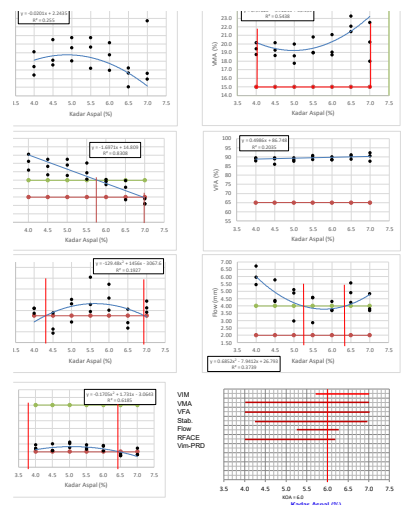
Kadar Aspal	Density	VMA	VIM	VIM PRD	VFA	Stabilitas	Flow	RFACE
%	gr/cc	%	%	%	%	Kg	Mm	
4,0	2,118	19,80	7,69		89,30	891,9	6,35	1,19
4,5	2,131	19,71	6,15		89,20	516,6	5,08	1,21
5,0	2,183	18,18	6,21		87,99	856,0	3,93	1,02
5,5	2,148	19,91	6,49		89,21	1262,8	3,71	1,31
6,0	2,187	18,90	4,81		88,43	1257,9	3,72	1,37
6,5	2,097	22,67	3,44		90,75	624,1	5,24	0,74
7,0	2,173	20,3	2,2		89,1	969	3,80	0,79

Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018

AC-	Min	15	3,0	2	65	800	2	1
WC	Maks	-	5,0	-	-	-	4	4

Tabel 7 menunjukkan hasil uji karakteristik Marshall pada campuran AC-WC kontrol dengan kadar aspal 4,0%–7,0%. Peningkatan kadar aspal memengaruhi nilai densitas dan stabilitas, yang mencapai maksimum pada kadar 5,0%–5,5%. Stabilitas tertinggi tercapai pada kadar 5,5% sebesar 1262,8 kg, namun mulai menurun pada kadar 6,5% dan 7,0%.

Mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018, nilai karakteristik Marshall memenuhi syarat pada kadar 5,5%–6,5%. Karena uji PRD tidak dilakukan, kadar aspal optimum (KAO) ditetapkan sebesar 6,0% sebagai nilai tengah rentang tersebut. Grafik kecenderungan setiap parameter ditampilkan pada Gambar 2.



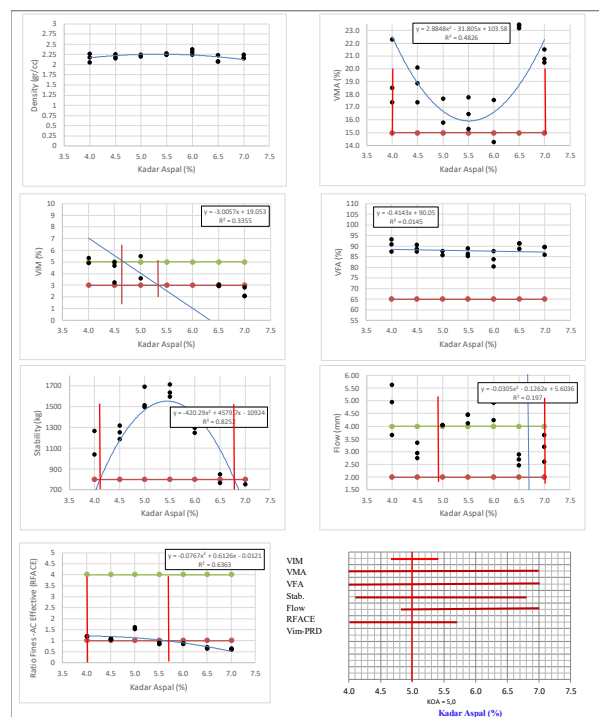
Gambar 2. Grafik Karakteristik Pendekatan *Marshall* AC-WC Kontrol

Tabel 8. Resume pengujian karakteristik pendekatan marshall AC-WC+50%RAP+BTK

Kadar Aspal	Density	VMA	VIM	VIM PRD	VFA	Stabilitas	Flow	RFACE
	gr/cc	%	%	%	%	Kg	mm	
4,0	2,115	19,91	7,75		89,38	806,3	4,64	1,19
4,5	2,173	18,13	4,12		88,02	1285,6	2,85	1,21
5,0	2,222	16,75	4,55		86,73	1603,3	4,04	1,02
5,5	2,203	17,89	0,34		87,68	1673,9	4,45	0,84
6,0	2,214	17,89	0,02		87,63	1323,1	4,94	0,87
6,5	2,076	23,44	2,95		91,14	704,5	2,58	0,65
7,0	2,163	20,7	2,1		89,5	667	2,9	0,61

Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018								
AC-	Min	15	3,0	2	65	800	2	1
WC	Maks	-	5,0	-	-	-	4	4

Tabel 8 menunjukkan hasil uji Marshall pada campuran AC-WC dengan 50% RAP dan bioaspal tempurung kelapa (BTK). Densitas maksimum tercapai pada kadar aspal 4,5%–5,0% (2,183 gr/cc), dan stabilitas tertinggi sebesar 1285,6 kg pada kadar 4,5%. Flow tetap dalam batas standar, namun menurun signifikan pada kadar $\geq 6,5\%$. VIM menurun dan VFA meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018, kadar 5,0%–5,5% memenuhi kriteria. Karena PRD tidak diuji, KAO ditetapkan sebesar 5,5%. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran dengan 50% RAP dan BTK masih memenuhi standar kinerja AC-WC.



Gambar 3. Grafik Karakteristik Pendekatan Marshall AC-WC+50%RAP+BTK

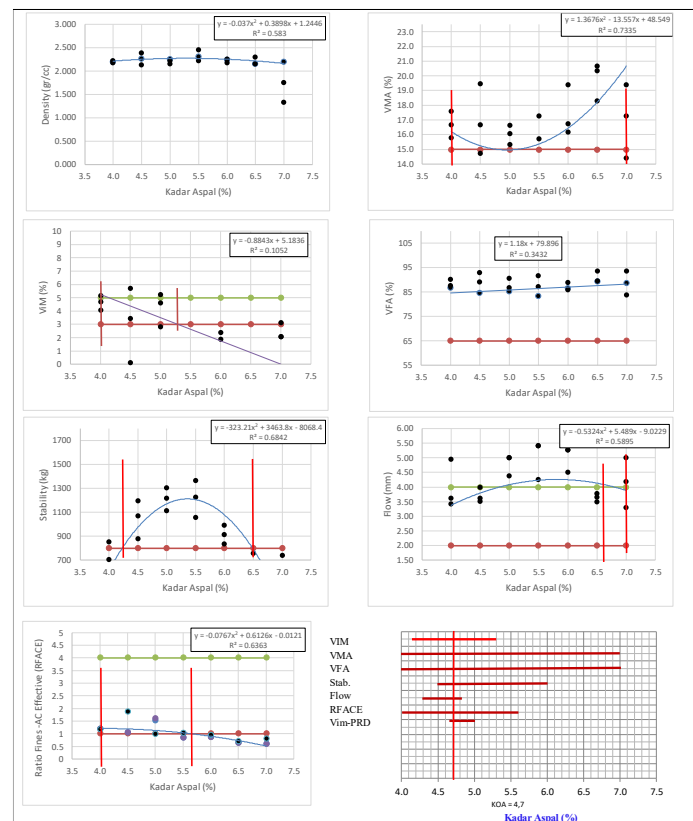
Tabel 9. Resume pengujian karakteristik pendekatan marshall AC- WC+75%RAP+BTK

Kadar Aspal	Density	VMA	VIM	VIM PRD	VFA	Stabilitas	Flow	RFACE
%	gr/cc	%	%	%	%	Kg	mm	
4,0	2,188	17,14	4,63		87,24	591,5	4,29	1,19
4,5	2,199	17,18	2,92		87,24	591,5	4,29	1,21
5,0	2,241	16,01	3,71		86,00	1260,8	5,00	1,02
5,5	2,264	15,59	0,27		87,63	1298,0	5,41	0,84
6,0	2,209	18,09	0,24		88,39	954,6	5,28	0,87
6,5	2,140	21,08	0,04		89,85	445,6	3,71	0,65
7,0	2,265	16,9	2,1		86,2	642	4,10	0,61

Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018								
AC-WC	Min	15	3,0	2	65	800	2	1
	Maks	-	5,0	-	-	-	4	4

Tabel 9 menyajikan hasil uji Marshall pada campuran AC-WC dengan 75% RAP dan bioaspal tempurung kelapa (BTK). Stabilitas tertinggi dicapai pada kadar aspal 5,5% sebesar 1298,5 kg, dengan flow 5,41 mm dan densitas 2,264 gr/cc. VIM menurun tajam dari 4,63% (4,0%) menjadi 2,1% (7,0%), sedangkan VFA meningkat, tertinggi pada 6,0% sebesar 94,5%. Nilai RFACE tetap dalam batas standar, namun cenderung menurun pada kadar aspal tinggi.

Mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018, kadar 4,5%–5,5% memenuhi kriteria. Karena PRD tidak diuji, KAO ditetapkan sebesar 4,7%. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran dengan 75% RAP masih layak digunakan, meskipun kontrol terhadap VIM dan flow penting untuk mencegah deformasi dini.



Gambar 4. Grafik Karakteristik Pendekatan Marshall AC-WC+75%RAP+BTK

3.1.1 Karakteristik Campuran pada kondisi KAO

Pada kondisi KAO (Kadar Aspal Optimum) didapat nilai karakteristik pendekatan *marshall* yang sesuai dengan yang dianjurkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga Jalan dan Jembatan Tahun 2018, Revisi 2. Nilai karakteristik pendekatan *marshall* pada kondisi KAO untuk campuran AC-WC kontrol, AC-WC+50%RAP+BTK, AC-WC+75%RAP+BTK tertuang pada Tabel 10.

3.4 Perbandingan Karakteristik Pendekatan *Marshall* pada Campuran

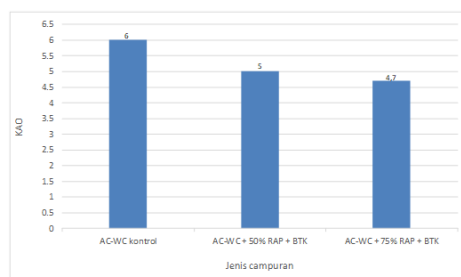
Perbandingan karakteristik ini bertujuan untuk mengetahui KAO (Kadar Aspal Optimum) pada tiap campuran yang dibuat pada penelitian ini. Untuk perbandingan karakteristik pendekatan *marshall* pada tiap campuran tertuang pada Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan Karakteristik Pendekatan Marshall pada Tiap Campuran

Sifat-sifat Campuran	Satuan	Jenis Campuran			Spesifikasi Bina Marga
		AC-WC Kontrol	AC-WC +50%RAP+BTK	AC-WC +75%RAP+BTK	
Kadar Bioaspal Optimum	%	0,0	8,0	8,0	-
Kadar Aspal Optimum	%	6,0	5,0	4,7	-
Kadar Aspal Efektif	%	5,38	4,210	3,560	-
Penyerapan Aspal	gr/mm	1,37	1,020	1,210	Min. 1, Maks. 4
Kepadatan	%	2,187	2,245	2,199	-
Rongga dalam campuran (VIM)	%	4,81	3,530	2,920	Min. 3, Maks. 5
Rongga dalam mineral agregat (VMA)	%	18,90	15,860	17,180	Min. 15
Rongga terisi agregat (VFA)	Kg	88,43	85,850	87,200	Min. 65
Stabilitas marshall	Kg	1257,9	1603,3	973,8	Min. 800
Pelelehan	mm	3,72	4,0	3,8	Min. 2, Maks. 4
Marshall Quotient	Kg/mm	338,6	396,9	255,9	Min. 250

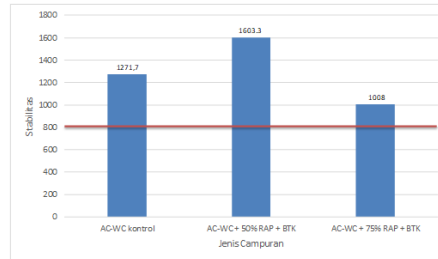
Dari data di atas diperoleh diagram gabungan ketiga campuran beraspal yang dibuat pada penelitian ini. Grafik yang disajikan termasuk grafik VIM, VMA, VFA, *Flow*, Stabilitas, *Marshall Quotient*, *RFACE*, dan KAO.

Grafik gabungan ketiga campuran tertuang pada Gambar 13. sampai dengan Gambar 5.



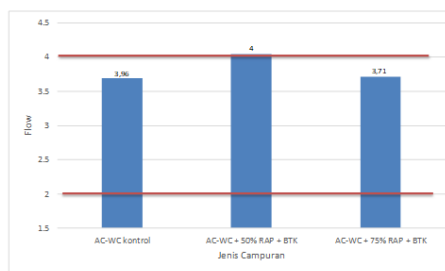
Gambar 5. Diagram Gabungan Nilai Kadar Aspal Optimum

Gambar 5 menunjukkan perbandingan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dari ketiga campuran. Campuran AC-WC kontrol memiliki KAO tertinggi sebesar 6,0%, diikuti AC-WC + 50% RAP + BTK sebesar 5,0%, dan terendah pada campuran 75% RAP + BTK sebesar 4,7%. Penurunan KAO seiring meningkatnya kadar RAP menunjukkan bahwa bioaspal tempurung kelapa efektif memulihkan sifat plastis RAP, sehingga kebutuhan aspal baru berkurang.



Gambar 6. Diagram Gabungan Nilai Stabilitas Tiap Campuran Beraspal

Gambar 6 menunjukkan bahwa campuran AC-WC + 50% RAP + BTK memiliki stabilitas tertinggi, yaitu 1603,3 kg, menunjukkan ketahanan struktural terbaik terhadap beban lalu lintas. Campuran kontrol menghasilkan stabilitas 1271,7 kg, sedangkan campuran dengan 75% RAP + BTK menurun menjadi 1008 kg, diduga akibat sifat campuran yang lebih kaku akibat tingginya kadar RAP. Meski masih di atas batas minimum spesifikasi Bina Marga (800 kg), penurunan stabilitas pada 75% RAP menunjukkan perlunya peremaja yang lebih efektif. Campuran dengan 50% RAP + BTK dianggap paling seimbang antara kekuatan dan fleksibilitas, sehingga potensial digunakan sebagai campuran AC-WC untuk perkerasan jalan.

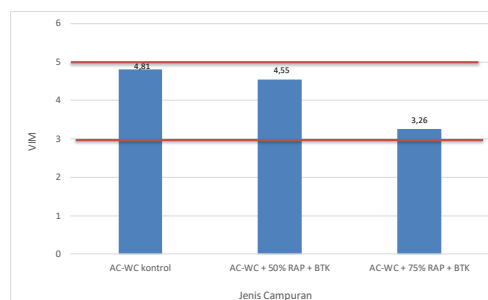


Gambar 7. Diagram Gabungan Nilai *Flow* Tiap Campuran Beraspal

Berdasarkan grafik, seluruh campuran memenuhi kriteria flow menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni 2–4 mm. Nilai tertinggi terdapat pada campuran AC-WC + 50% RAP + BTK (4 mm), diikuti campuran kontrol (3,96 mm), dan 75% RAP + BTK (3,71 mm).

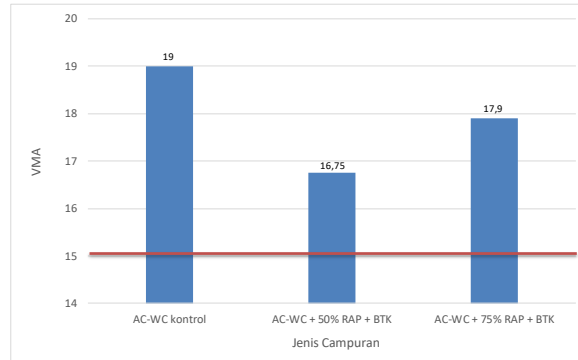
Flow yang lebih tinggi mencerminkan fleksibilitas terhadap beban, namun jika berlebihan dapat memicu rutting, sementara nilai terlalu rendah meningkatkan risiko retak. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan bioaspal tempurung kelapa efektif menjaga fleksibilitas campuran daur ulang dalam batas ideal.

Dengan nilai flow yang tetap sesuai standar, kinerja terhadap deformasi plastis dinilai baik untuk lapisan aus. Terutama pada campuran 50% RAP, meskipun nilai flow mendekati batas atas, stabilitas tinggi tetap menjamin performa struktural optimal.



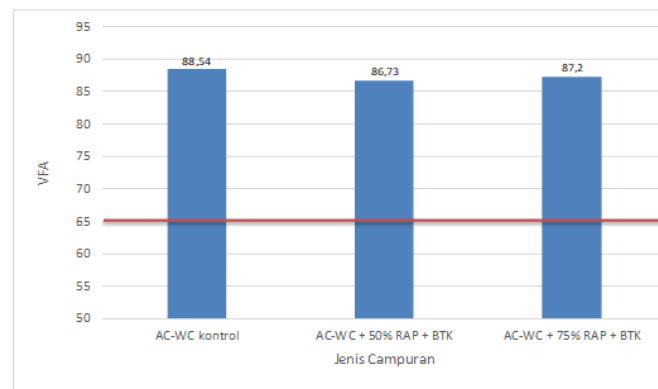
Gambar 8. Diagram Gabungan Nilai VIM Tiap Campuran Beraspal

Gambar 8 menunjukkan bahwa seluruh campuran memenuhi batas VIM sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu 2–5%. VIM berperan dalam menjaga keseimbangan antara kepadatan dan ruang kosong, yang penting untuk mencegah deformasi plastis dan kerusakan akibat kelembapan. Campuran kontrol memiliki VIM tertinggi (4,81%), diikuti 50% RAP + BTK (4,55%), dan 75% RAP + BTK terendah (3,25%). Nilai terlalu tinggi membuat campuran berpori, sedangkan terlalu rendah meningkatkan risiko retak. Campuran 50% RAP + BTK dinilai paling ideal karena menjaga keseimbangan pori dan kepadatan. Penggunaan bioaspal tempurung kelapa juga membantu mempertahankan ikatan agregat dan kestabilan ruang pori.



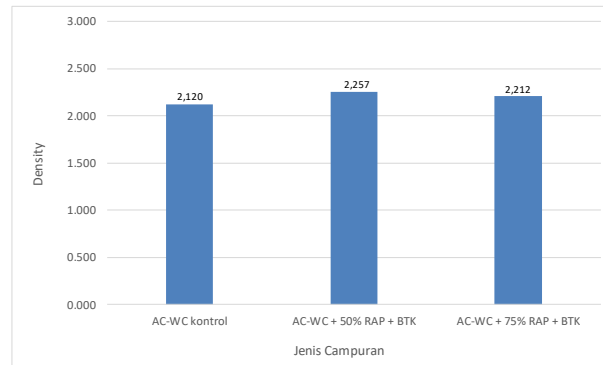
Gambar 9. Diagram Gabungan Nilai VMA Tiap Campuran Beraspal

Gambar 9 menunjukkan bahwa seluruh campuran memenuhi nilai VMA minimum 15% sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. VMA mencerminkan ruang antar agregat yang dapat diisi aspal, penting untuk ketahanan terhadap beban dan kerusakan dini. Campuran kontrol memiliki VMA tertinggi (19%), diikuti 75% RAP + BTK (17,9%), dan 50% RAP + BTK (16,75%). Meskipun campuran RAP memiliki VMA lebih rendah, nilainya tetap di atas batas standar. Penurunan ini disebabkan oleh sifat RAP yang lebih padat dan halus. Campuran 50% RAP + BTK menunjukkan keseimbangan antara kepadatan dan daya tahan terhadap bleeding. Bioaspal tempurung kelapa membantu menjaga fleksibilitas dan ikatan agregat, menjadikan campuran tetap memenuhi standar teknis dan ramah lingkungan.



Gambar 10. Diagram Gabungan Nilai VFA Tiap Campuran Beraspal

Gambar 10 membandingkan nilai VFA dari tiga campuran: AC-WC Kontrol, 50% RAP + BTK, dan 75% RAP + BTK. VFA menunjukkan seberapa baik aspal mengisi rongga antar agregat, yang penting untuk daya tahan dan stabilitas. Ketiganya mencatat nilai di atas batas minimum 65% menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2: kontrol sebesar 88,54%, 50% RAP + BTK 86,73%, dan 75% RAP + BTK 87,2%. Ini membuktikan bahwa penambahan RAP dan bioaspal tidak mengurangi kualitas campuran. Dengan hasil tersebut, seluruh campuran dinilai layak digunakan, serta menunjukkan bahwa penggunaan RAP dan BTK mendukung kualitas teknis sekaligus ramah lingkungan.



Gambar 11. Diagram Gabungan Nilai *Density* Tiap Campuran Beraspal

Gambar 11 menunjukkan perbandingan density dari tiga campuran: AC-WC Kontrol, 50% RAP + BTK, dan 75% RAP + BTK. Density berperan penting dalam menunjang daya dukung dan ketahanan lapis perkerasan.

Campuran 50% RAP + BTK memiliki density tertinggi (2,257 gr/cm³), disusul 75% RAP + BTK (2,212 gr/cm³), dan kontrol (2,120 gr/cm³). Ini menunjukkan bahwa penambahan RAP dan BTK mampu meningkatkan kepadatan tanpa menurunkan kualitas campuran.

Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan RAP dan BTK tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga meningkatkan kinerja teknis dan potensi umur layanan campuran aspal.

3.4.1 Indeks Perendaman (IP)

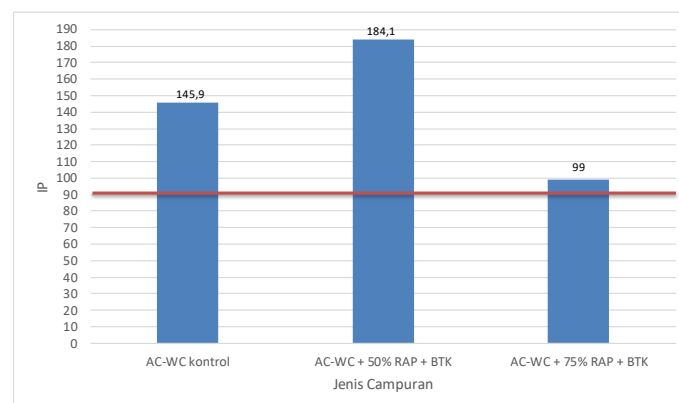
Setelah penentuan KAO, masing-masing campuran dibuat 6 benda uji untuk pengujian indeks perendaman (IP). Uji IP bertujuan mengevaluasi ketahanan campuran terhadap paparan air. Benda uji direndam pada suhu 60°C selama 30 menit dan 24 jam, lalu diuji Marshall untuk mengetahui stabilitas dan flow.

IP dihitung dari rasio stabilitas setelah dan sebelum perendaman dikali 100%, untuk menilai ketahanan campuran terhadap kelembaban dan suhu tinggi. Campuran 50% RAP + BTK mencatat IP tertinggi (184,1), menunjukkan ketahanan terbaik. Campuran kontrol memiliki IP 145,9, dan 75% RAP + BTK terendah, yaitu 99,0. Seluruh campuran tetap memenuhi batas minimum IP 90 sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga layak digunakan.

Gambar 20 menunjukkan perbandingan nilai Indeks Perendaman (IP) tiga campuran: AC-WC kontrol, 50% RAP + BTK, dan 75% RAP + BTK. IP mengukur ketahanan campuran terhadap air—semakin tinggi nilainya, semakin baik. Garis merah menunjukkan batas minimum IP sebesar 90.

Campuran 50% RAP + BTK mencatat IP tertinggi (184,1), disusul kontrol (145,9), dan 75% RAP + BTK (99). Meski nilai IP 75% RAP lebih rendah, tetap memenuhi spesifikasi minimum.

Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi 50% RAP dan BTK paling optimal dalam mempertahankan ketahanan terhadap perendaman, sementara kadar RAP yang terlalu tinggi dapat menurunkan kualitas ikatan dalam campuran. Penggunaan RAP harus mempertimbangkan keseimbangan antara performa teknis dan aspek keberlanjutan.



Gambar 12. Diagram Gabungan Nilai IP Tiap Campuran Beraspal

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pada campuran beraspal AC-WC dengan menggunakan limbah beton aspal dan bahan peremaja bioaspal tempurung kelapa dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Untuk karakteristik campuran AC-WC kontrol memenuhi spesifikasi umum bina marga jalan dan jembatan tahun 2018, revisi 2, dengan nilai *Density*, VIM, VMA, VFA, Stabilitas, Flow, dan Penyerapan aspal memenuhi nilai maksimum dan nilai minimum pada spesifikasi umum jalan dan jembatan tahun 2018, revisi 2.
2. Untuk karakteristik campuran beraspal yang menggunakan limbah beton aspal di laboratorium dengan kadar tinggi serta bioaspal tempurung kelapa sebagai bahan peremaja dibuat dua perbandingan, yaitu dengan limbah 50% dan limbah 75%. Kedua campuran dengan persentase limbah tersebut memenuhi spesifikasi umum bina marga jalan dan jembatan tahun 2018, revisi 2, dengan nilai *Density*, VIM, VMA, VFA, Stabilitas, Flow, dan Penyerapan aspal memenuhi nilai maksimum dan nilai minimum pada spesifikasi umum jalan dan jembatan tahun 2018, revisi 2.
3. Perbandingan campuran beraspal AC-WC+50%RAP+BTK, dan AC-WC+75%RAP+BTK terhadap campuran AC-WC kontrol pada kondisi KAO memenuhi spesifikasi umum bina marga jalan dan jembatan tahun 2018, dengan nilai *Density*, VIM, VMA, VFA, Stabilitas, Flow, dan Penyerapan aspal memenuhi nilai maksimum dan nilai minimum pada spesifikasi umum jalan dan jembatan tahun 2018, revisi 2. Namun apabila ingin mendapatkan nilai stabilitas yang tinggi, campuran beraspal AC-WC+50%+RAP+BTK lebih baik dibanding dengan campuran AC-WC+75%+BTK. Namun kedua campuran yang menggunakan limbah dapat digunakan hingga campuran 75% karena memenuhi spesifikasi umum bina marga jalan dan jembatan tahun 2018, revisi 2.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. K. St, H. K. Dist, and H. Hiroshima, "Income-based Fare Orientation in Urban Public Transportation Services in Developing Countries : A case study in Hanoi , Vietnam," *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.*, vol. 13, no. 2015, pp. 1300–1311, 2019.
- [2] Bina Marga. (2018). General Specification of Indonesia Highways and Bridges.104.
- [3] Directorate General of Highways. (2020). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). Ministry of Public Works and Housing, Oktober, 1036.
- [4] Dwi Putri, A., Putra, S., Sulistyorini, R., & Herianto, D. (2022). Pengaruh Penambahan Arang Tempurung Kelapa Terhadap Durabilitas Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). *Jrsdd*, 10(1), 155–166.
- [5] Ilmi, M. R. (2023). Pemanfaatan Limbah Tempurung Kelapa menjadi Briket ArangKelapa: Aspek Produksi.
<https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/48126%0Ahttps://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/48126/18423167.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] Jogiyanto Hartono (1989:1). (2006). Bab 2 landasan teori. Aplikasi dan Analisis Literatur Fasilkom UI, 2019, 4–25. <https://123dok.com/document/yer4810q-bab-landasan-teori.html>
- [7] Maulana, A., Amaliah, M., & Utami, R. (2020). Pemanfaatan Limbah Beton Sisa Pengujian Sebagai Substitusi Agregat Pada Campuran AC-WC. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*, 22(1), 87–95.<https://doi.org/10.35313/potensi.v22i1.1678>
- [8] MUHAMMAD IRSAN B, Ahmad Tawfiequrrahman Yuliansyah, S.T., M.T., D.Eng.; Prof. Ir. Suryo Purwono, M.A.Sc., P. (2018). Hydrothermal Treatment Limbah Tempurung Kelapa Menjadi Bahan Bakar Padat. 5–6.
- [9] Oktavia, S. R. (2018). *Jurnal teknik sipil*. 13(November), 109–118.
- [10] Pemanfaatan Abu Tempurung Kelapa sebagai Bahan Pengisi, P., Elvira Putri, H. A., & Widayanti, A. (2023). Pengaruh Pemanfaatan Abu Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Pengisi (Filler) pada Campuran Aspal Lapis AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course) I N F O A R T I K E L ABSTRAK. *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 1(1), 107–119.
- [11] Pratama, R. (2021). Studi Karakteristik Beraspal Menggunakan Bioaspal. 4–21. Refi, A. (2021). Efek Pemakaian Pasir Laut Sebagai Agregat Halus Pada

- [12] Campuran Aspal Panas (Ac-Bc) Dengan Pengujian Marshall. 3(2), 6.
- [13] Sihombing, A. V. R., Subagio, B. S., & Hariyadi, E. S. (2018). Potensi Bioaspal Pada Bahan Daur Ulang Aspal Dan Campuran Beraspal Hangat. *Jurnal Transportasi*, 18(1), 59–66. <http://journal.unpar.ac.id/index.php/jourjournaltranspor/article/view/2975>
- [14] SNI 03-6819-2002. (2002). Spesifikasi Agregat Halus untuk Campuran
- [15] Perkerasan Beraspal. Badan Standardisasi Nasional (BSN), 4, 1–2.
- [16] Syakur Asyurah, M. (2024). Analisis Eksperimental Campuran Asphalt Concrete- Wearing Course (Ac-Wc) Menggunakan Asbuton Murni Full Ekstraksi Dengan Modifier Bioaspal Tandan Kelapa Sawit Tesis. 5–10.
- [17] Syukuriah, A. I., & Adha, A. N. (2023). Pengaruh Penggunaan Serbuk Arang Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Pengisi (Filler) Terhadap Karakteristik Laston Ac-Wc. *Repository.Unej.Ac.Id*, Senarai, 225–234. <https://repository.unej.ac.id/handle/123456789/9239>
- [18] Teknik Sipil_30202000089_fullpdf.pdf. (n.d.).
- [19] Verani Rouly Sihombing, A., Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung Jln Gegerkalong Hilir, J., Barat, J., & Sugeng Subagio, B. (2023). Kepekaan Terhadap Perubahan Temperatur Aspal Daur Ulang Yang Dimodifikasi Oleh Bioaspal. *Berkala FSTPT*, 1(1), 2023.
- [20] Yuniarti, R. (2017). Modifikasi Aspal Dengan Getah Pinus. 1(December 2015), 0– 7.
- [21] Yusuf Naufal, A., Putra, S., Karami, M., & Sulistyorini, R. (2022). Durabilitas Campuran AC-WC Berbasis RAP Menggunakan Arang Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Tambah Pada Aspal. 10(1), 193–204.
- [22] 능첨엽, & 장형심. (2023). 교차지연모형을 적용한 종단적 상호관계: 초등학교 4학년부터 중학교 1학년까지 한국 다문화 학생이 지각한 사회적 지지, 자아탄력성, 성취동기. *The Education Research Institute*, 21(4), 207–232. <https://doi.org/10.31352/jer.21.4.207>
- [23] Allwar, Y. N. (den 3 September 2019). Pemanfaatan Limbah Tempurung Kelapa Menjadi Arang Tempurung Kelapa dan Granular Karbon Aktif Guna Meningkatkan Kesejahteraan Desa Watuduwur, Bruno, Kabupaten Purworejo. Hämtat från *Journal.uii.ac.id*: <https://journal.uii.ac.id/ajie/article/view/14022#:~:text=Tempurung%20kela>
pa%20merupakan%20limbah%20padat,keperluan%20rumah%20tangga%20atau%20souvenir
- [24] BPS. (den 6 Mei 2024). Persentase Limbah Cair Industri Cair yang Diolah Secara Aman(Persen), 2021-2022. Hämtat från <https://www.bps.go.id/>: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTI3OSMy/persentase-limbah-cair-industri-cair-yang-diolah-secara-aman.html>
- [25] BPS. (den 2 Mei 2024). Produksi Tanaman Perkebunan (Ribuan Ton). Hämtat från <https://www.bps.go.id/>: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTMyIzI=/produksi-tanaman-perkebunan--ribuan-ton-.html>
- [26] Halimatu, I. H. (2014). SIFAT-SIFAT TEKNIS CAMPURAN LASTON YANG MENGANDUNG BIOASPAL UNTUK KATEGORI LALU LINTAS BERAT DENGAN PENGUJIAN MARSHALL IMMERSION. Hämtat från <https://etd.repository.ugm.ac.id/>: <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/67829>
- [27] Muallif. (den 20 November 2024). Fungsi Aspal: kegunaan, Manfaat, dan Penerapan alam Berbagai Bidang. Hämtat från *an-nur.ac.id*: <https://an-nur.ac.id/blog/fungsi-aspal-kegunaan-manfaat-dan-penerapannya-dalam-berbagai-bidang.html#:~:text=Berikut%20adalah%20beberapa%20fungsi%20utama%20aspal%20dalam%20berbagai,Material%20Perekatan%20...%205%205.%20Sebagai%20Pelindung%20Lingkungan>
- [28] PPID. (den 9 September 2024). KLHK Ajak Masyarakat “Gaya Hidup Minim Sampah” dalam Festival LIKE 2. Hämtat från <https://ppid.menlhk.go.id/>: <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/7818/klhk-ajak-masyarakat-gaya-hidup-minim-sampah-dalam-festival-like-2#:~:text=Berdasarkan%20komposisi%20sampah%20yang%20ada,prosentasi%20sekitar%2044%2C37%25>
- [29] Rahayu, A. W. (den 18 Oktober 2024). Pengertian Agregat Kasar, Jenis-Jenis, dan Syarat SNI yang Berlaku. Hämtat från *Mega Baja*: <https://www.megabaja.co.id/pengertian-agregat-kasar-jenis-jenis-dan-syarat-sni-yang-berlaku/>