



Analisis Karakteristik *Marshall* dengan Memanfaatkan Lignin sebagai Pengganti *Filler* pada Campuran Aspal Beton ¹

Analysis of Marshall Characteristics by Utilizing Lignin as a Filler Substitute in Asphalt Concrete Mixes

Nurul Aswad ^a, Shanti Wahyuni Megasari ^a, Alfian Saleh ^{a, 2}

^a Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

ABSTRAK

Lignin merupakan zat selulosa yang terkandung dalam tumbuhan berkayu lunak dan dapat digunakan sebagai bahan pendispersi dan penstabil pada *asphalt extender*, *dyes* dan beton. Lignin dapat dengan mudah ditemukan sehingga memiliki potensi menjadi energi yang terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *marshall* pada aspal beton. Metode yang digunakan yaitu studi eksperimental di laboratorium berdasarkan pada Bina Marga 2018 Revisi II tahun 2020. Penelitian menggunakan variasi substitusi lignin sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap berat *filler*. Hasil penelitian diperoleh bahwa setiap substitusi 25% lignin pada campuran aspal beton cenderung meningkat pada parameter VIM dan VMA. Untuk parameter stabilitas, *flow*, MQ dan *density* cenderung mengalami penurunan dengan adanya substitusi lignin namun hasil yang didapat sesuai persyaratan Bina Marga 2018 Revisi II tahun 2020. Pada parameter VFWA dan VITM, tidak ditemukan variasi yang sepenuhnya memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan lignin sebagai bahan pengganti *filler* dalam campuran aspal beton belum dapat direkomendasikan untuk digunakan.

Kata Kunci: AC-WC, Aspal, Filler, Lignin, Marshall

ABSTRACT

Lignin is a cellulose substance contained in soft woody plants and can be used as dispersing and stabilizing agent in asphalt extenders, dyes and concrete. The widespread presence of lignin suggest its viability as a renewable energy alternative. The research is intended to investigate the marshall characteristics of asphalt concrete mixtures. An experiemntal laboratory approach was adopted in accordance with Bina Marga 2018 Revision II (2020) guidelines. The research used variations in lignin substitution of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% for filler weight. The research results showed that every 25% lignin substitution in the asphalt concrete mixture tended to increase the VIM and VMA parameters. For the stability parameters, flow, MQ and density tend to decrease with lignin substitution, but the results obtained still meet the 2018 Bina Marga Revision II 2020 requirements. In the VFWA and VITM parameters there are no variations that meet the requirements. Based on the findings, lignin is not advisable to be used as a filler substitute in asphalt concrete.

Keywords: Marshall, Lignin, Asphalt, AC-WC, Filler Substitution

PENDAHULUAN

Aspal beton merupakan campuran aspal keras dan agregat dengan gradasi tertentu yang diolah melalui pencampuran, penghamparan, serta pemadatan pada suhu panas tertentu (Besouw et al., 2019). Jenis aspal beton yang umum diaplikasikan adalah AC-WC, yang berperan

¹ Info Artikel: Received: 24 September 2024, Accepted: 30 Juli 2025

² Corresponding Author: Alfian Saleh, alfian.saleh@unilak.ac.id

sebagai lapisan aus guna menahan beban kendaraan serta dituntut memiliki ketahanan terhadap air, tekstur permukaan yang rata, dan kemampuan memberikan gaya gesek yang baik (Susanto, 2020). Campuran aspal beton tersusun atas tiga komponen utama, yaitu aspal, agregat, dan *filler*. Sebagai komponen penting dalam campuran, agregat terdiri dari massa padat atau partikel mineral seperti batu pecah, pasir, dan abu batu yang berfungsi memperkuat struktur keseluruhan (Bakarbessy & Pattireuw, 2019). Agregat digunakan sebagai salah satu bahan pencampur selain aspal yang kemudian membentuk kombinasi (Fitri et al., 2018). Agregat pengisi campuran terdiri dari agregat kasar dan halus. Aspal yang berasal dari penyulingan minyak mentah dan terdiri dari senyawa hidrokarbon (bitumen), memiliki karakteristik penting seperti daya kohesi, ketahanan terhadap perubahan temperatur, serta kemampuan mengikat agregat (Ridwan & Nadia, 2017). Sedangkan *filler* yaitu material pengisi rongga – rongga pada campuran aspal beton dengan fraksi halus sebesar 75% yang lolos saringan No. 200 dan bersifat non plastis (Imannurohman et al., 2020).

Sebelum pencampuran, agregat harus dianalisis melalui uji gradasi dan Kadar Aspal Optimum (KAO) harus ditentukan untuk mencapai keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran (Ayun & Prastyanto, 2021). Dalam menentukan kadar aspal optimum suatu campuran, perhitungan terhadap proporsi aspal ini untuk mengidentifikasi kadar optimal serta memberikan gambaran awal. Proses ini dilakukan setelah proses analisa saringan (Haurissa et al., 2025). Salah satu bahan alami yang memiliki potensi sebagai *filler* alternatif adalah lignin, yaitu komponen utama biomassa lignoselulosa yang terdapat pada dinding sel tumbuhan, terutama daun jarum (27-33%) dan daun lebar (sekitar 22%) (Umindya et al., 2019). Struktur kimia lignin mengandung ikatan aril-akil dan eter yang memberikan ketahanan terhadap degradasi asam, sehingga lignin mampu melindungi selulosa dan senyawa karbohidrat lainnya dalam serat tumbuhan (Sokanandi et al., 2014). Untuk mengetahui kelayakan pemanfaatannya, dilakukan pengujian *Marshall*, yang mencakup tujuh parameter utama yaitu *void in mineral aggregate* (VMA), *void in total mix* (VITM), *void filled with asphalt* (VFWA), *Marshall quotient* (MQ), *density*, *flow* dan stabilitas sebagai indikator performa campuran aspal (Rudi, 2023).

Peningkatan performa perkerasan jalan sangat bergantung pada kualitas material penyusunnya. Dalam campuran aspal beton, filler berperan penting walaupun komposisinya relatif sedikit, namun berkontribusi besar terhadap kekuatan struktural dan stabilitas campuran (Anggraini et al., 2020). *Filler* adalah salah satu komponen penting pada campuran aspal beton selain aspal dan agregat. Meskipun dengan persentase yang kecil namun bukan berarti tidak memiliki dampak terhadap perkuatan campuran. Material yang sering digunakan sebagai *filler* yaitu semen dan abu batu, namun karena penggunaan berkepanjangan mengakibatkan persediaannya semakin mahal. Untuk mengatasi hal tersebut maka diperlukan alternatif lain yang mudah didapat dan memiliki banyak persediaan, salah satunya yaitu lignin. Alternatif ini diharapkan mampu meningkatkan kekuatan campuran aspal beton (Tambunan & Pitriani, 2019).

Lignin, senyawa organik yang melimpah pada dinding sel tumbuhan berkayu lunak dan keras, telah dikenal memiliki sifat pengikat dan daya tahan kimia tertentu (Setiati et al., 2020). Zat ini dapat ditemukan pada tumbuhan kayu lunak maupun keras (Santoso, 2017). Hal ini membuat lignin dapat dengan mudah ditemukan sehingga berpotensi menjadi inovasi baru mengenai bahan bio yang terbarukan dan ramah lingkungan, struktur kimia lignin yang mengandung ikatan eter dan aril-alkil menjadikannya tahan terhadap degradasi asam dan dapat berfungsi sebagai penguat dalam matriks campuran beraspal (Bina et al., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penggunaan bahan alternatif seperti abu cangkang kelapa sawit, bubuk talk, dan cangkang lokan sebagai pengganti filler dalam campuran AC-WC (Chasanah & Sukmo, 2023). Namun penggunaan lignin sebagai pengganti *filler* dalam campuran aspal beton masih sangat terbatas dan belum dikaji secara menyeluruh dari segi karakteristik mekanis maupun ketahanannya terhadap air dan beban lalu lintas. Sehingga perlu dilakukan studi eksperimental yang mengkaji secara sistematis performa campuran AC-WC dengan substitusi lignin pada berbagai variasi terhadap parameter *marshall*. Padahal, lignin sulfonat maupun bentuk olahan lainnya memiliki potensi sebagai bahan pengisi yang kompetitif jika ditinjau dari aspek ketersediaan, keberlanjutan, dan fungsi teknis.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karaktersitik *marshall* dari campuran aspal beton jenis AC-WC dengan menggunakan lignin sebagai bahan pengganti *filler* pada variasi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah sebagai referensi untuk pemanfaatan lignin sebagai bahan alternatif dalam teknologi perkerasan berkelanjutan.

MATERIAL DAN METODOLOGI PENELITIAN

Material

Campuran AC-WC merupakan campuran yang terdiri dari aspal dan agregat (Tripoli et al., 2020). Aspal yang akan digunakan diambil dari PT. HKAstons dan untuk agregat diambil dari PT. RMB. Sedangkan *filler* didapatkan dari distributor terdekat. Pengujian material aspal dan agregat dilakukan berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi II Tahun 2020. Hasil pengujian aspal, agregat kasar, agregat halus dan gradasi agregat dapat dilihat pada Tabel 1, 2, 3 dan 4 berikut ini dan untuk grafik analisa saringan dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1 Hasil Pengujian Aspal

No.	Jenis Pengujian	Nilai Persyaratan (Spesifikasi khusus interim SKH-2.M.04)	Hasil Pengujian	Satuan	Keterangan
1	Berat jenis aspal	Minimal 1,0	1,004	gr/ml	Memenuhi
2	Penetrasi	60-70	64,3	-	Memenuhi
3	Titik Lembek	48-58	55	°C	Memenuhi

Tabel 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No.	Jenis Pemeriksaan	Persyaratan Bina Marga 2018 Revisi II tahun 2020	Hasil Pengujian	Satuan	Keterangan
1	Keausan dengan mesin <i>los angeless</i>	Maksimal 40%	22	%	Memenuhi
2	Berat jenis agregat	Minimal 2,5	2,596	gr/ml	Memenuhi

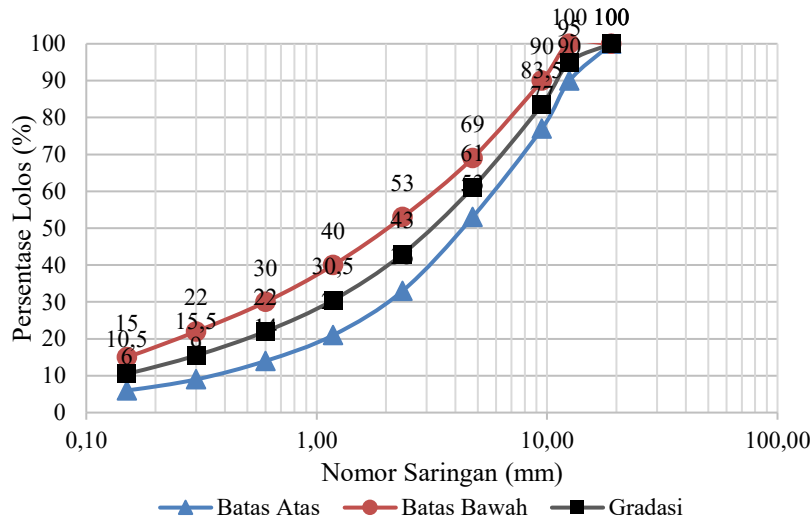
No.	Jenis Pemeriksaan	Persyaratan Bina Marga 2018 Revisi II tahun 2020	Hasil Pengujian	Satuan	Keterangan
3	Penyerapan air oleh agregat	Maksimal 3	2,32	%	Memenuhi

Tabel 3 Hasil Pengujian Agregat Halus

No.	Jenis Pemeriksaan	Persyaratan Bina Marga 2018 Revisi II tahun 2020	Hasil Pengujian	Satuan	Keterangan
1	Berat Jenis Agregat	Minimal 2,5	2,05	gr/ml	Memenuhi
2	<i>Sand Equivalent</i>	Minimal 50	94,110	%	Memenuhi
3	Penyerapan oleh agregat	Maksimal 3	2,185	%	Memenuhi

Tabel 4 Gradasi Agregat

Bahan	Ukuran Saringan		Jumlah Bahan Agregat						Jumlah Bahan Campuran		Ket.
			Tertahan Saringan			Spesifikasi Lolos Saringan (%)					
	mm	ASTM	Berat (gr)	Jumlah (gr)	%	Gradasi	Min	Max	Berat (gr)	%	
Agregat 1200 gr	19	3/4"	0	0	0	100	100	100	468	39%	CA
	12,5	1/2"	60	60	5	95	90	95			
	9,5	3/8"	138	198	16,5	83,5	77	90			
	4,75	No.4	270	468	39	61	53	69			
	2,36	No.8	216	684	57	43	33	53	654	54,5%	FA
	1,18	No.16	150	834	69,5	30,5	21	40			
	0,6	No.30	102	936	78	22	14	30			
	0,3	No.50	78	1014	84,5	15,5	9	22			
	0,15	No.100	60	1074	89,5	10,5	6	15			
0,075	No.200	48	1122	93,5	6,5	4	9				
Filler	Pan		78	1200	100	0			78	6,5%	MA
Total			1200						1200	100%	



Gambar 1 Grafik Analisa Saringan

Dan untuk skenario substitusi *filler* beserta rinciannya dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini:

Tabel 5 Rancangan Benda Uji dengan Variasi Lignin

Lignin (%)	Abu batu (%)	Jumlah sampel (buah)
0	100	3
25	75	3
50	50	3
75	25	3
100	0	3
Total sampel		15

Pada Tabel 4 merupakan tabel gradasi agregat dimana untuk agregat kasar (CA) didapat berat sebesar 468 gr, untuk agregat halus (FA) didapatkan berat sebesar 654 gr dan *filler* (MA) didapatkan berat sebesar 78 gr. Sehingga untuk mendapatkan persentase dari masing-masing gradasinya menggunakan persamaan (1) berdasarkan spesifikasi Bina Marga berikut ini:

$$\text{Persentase berat agregat} = \frac{\text{Berat Agregat Tertahan}}{\text{Berat Total Campuran}} \times 100\% \quad (1)$$

Sehingga persentase total dari masing-masing gradasi agregat dapat dilihat pada perhitungan berikut:

$$CA = \frac{468}{1200} \times 100\% = 39\%$$

$$FA = \frac{654}{1200} \times 100\% = 54,50\%$$

$$MA = \frac{78}{1200} \times 100\% = 6,5\%$$

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Universitas Lancang Kuning yang terletak di Jalan Yos Sudarso KM8 dan Laboratorium Teknik Kimia Universitas Riau yang terletak di Simpang Baru, Kecamatan Tampan, Kota Pekanbaru. Pengujian yang dilakukan merupakan pengujian karakteristik *marshall*, diawali dengan pengujian material yang akan dilakukan yakni aspal, agregat, dan lignin. Pengujian kadar lignin dilakukan dengan metode *X-ray Fluorescence* (XRF). Benda Uji seberat 200gr dimasukkan kedalam mesin XRF untuk kemudian dilakukan pengujian dan analisis kandungan lignin (Yue et al., 2022). Setelah dilakukan pengujian terhadap material selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji dengan jumlah yang telah ditentukan. Sebelum dilakukan pengujian *Marshall*, benda uji direndam terlebih dahulu selama 24 jam. Setelah dilakukan pengujian maka didapat nilai KAO, dan 7 parameter *marshall* yakni VITM, VFWA, VMA, MQ, stabilitas, *flow*, dan *density* (Machsus et al., 2021). Dari hasil tersebut selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan kesimpulan dari penelitian ini.

Tabel 6 menunjukkan rancangan benda uji yang akan dibuat untuk penelitian ini. Penetapan jumlah benda uji ini berdasarkan teori triplo yakni sebanyak 3 kali atau 3 sampel. Dimensi sampel yang akan dibuat dalam penelitian ini yaitu diameter 101,6 mm (4 in), tinggi 76,2 mm (3 in).

Tabel 6 Rancangan Benda Uji KAO

No	Kadar Aspal	Jumlah sampel (buah)
1	Pb – 1%	3
2	Pb – 0,5%	3
3	Pb	3
4	Pb + 0,5%	3
5	Pb + 1%	3
Total sampel		15

Sesuai dengan persyaratan Bina Marga 2018 Revisi II Tahun 2020, nilai KAO secara teoritis didapat dari perhitungan berikut:

$$Pb = 0,35 \times (\%CA) + 0,045 \times (\%FA) + 0,18 \times (\%MA) + K : \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

Pb = Kadar aspal,

CA = Agregat kasar tertahan didapat dari pengujian Analisa saringan,

FA = Agregat halus lolos saringan no.4,

FF = Agregat halus lolos saringan no.200,

K = Konstanta (untuk laston = 1).

Kadar aspal yang akan dibuat yaitu : -1%; -0,5%; Pb; +0,5%; +1%. Dari hasil pengujian tersebut selanjutnya diplotkan dalam bentuk grafik hubungan antar kadar aspal dan semua parameter *marshall* untuk kemudian dicari nilai tengahnya sebagai kadar aspal optimum.

HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengujian terdiri dari hasil pengujian *Marshall* untuk nilai KAO dan pengujian *Marshall* dengan variasi substitusi lignin.

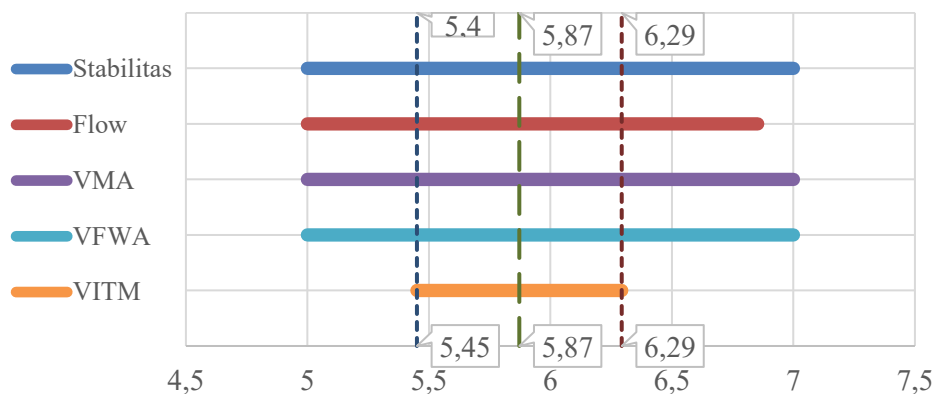
Penentuan Kadar Aspal Optimum

Nilai KAO yang didapat dengan pendekatan Pb adalah sebesar 5,875%. Nilai ini selanjutnya dijadikan sebagai nilai tengah kadar aspal yang akan digunakan pada campuran aspal beton tahap pertama. Adapun kadar yang perlu dibuat yaitu: 4,5%; 5%; 5,5%; 6%; 6,5%; 7%. Tabel 7 ini menunjukkan hasil yang didapatkan untuk menentukan KAO.

Tabel 7 Hasil Pengujian *Marshall*

% Aspal	Density	VMA	VFWA	VITM	Stabilitas	Flow	MQ
5,0	2,34	17,61	66,26	6,38	1306,81	2,70	513,16
5,5	2,36	17,73	72,64	4,85	1485,76	2,50	559,05
6,0	2,34	18,44	75,90	4,43	1509,74	3,08	733,19
6,5	2,39	17,72	86,77	1,99	2001,83	3,76	791,72
7,0	2,38	17,58	90,31	0,50	2062,15	4,10	687,74
Spek		≥15	≥65	≥3,0 - ≤5,0	≥800	≥2 - ≤4	≥250

Dari hasil tersebut dicari nilai kadar optimum dengan cara interpolasi dari nilai yang memenuhi parameter *marshall* sehingga didapat nilai KAO yaitu sebesar 5,87%. Seperti pada Gambar 2 berikut ini



Gambar 2 Grafik Nilai KAO

Pengujian *Marshall* dengan Variasi Lignin

Setelah KAO didapatkan maka dilakukan variasi substitusi *filler* dengan menggunakan lignin dengan kadar aspal yang sudah didapatkan dapat dilihat pada Tabel 8 berikut ini:

Tabel 8 Perbandingan Berat Lignin dan Abu Batu

Kadar Lignin (%)	Kadar Abu Batu (%)	Berat lignin (gr)	Berat abu batu (gr)	Kadar Aspal (%)
0	25	0	78	5,87
25	75	19,5	58,5	5,87
50	50	39	39	5,87
75	25	58,5	19,5	5,87
100	0	78	100	5,87

Dari hasil pengujian didapatkan hasil karakteristik *marshall* dengan substitusi lignin sulfonat sebagai *filler* pada Tabel 9 berikut ini:

Tabel 9 Rekapitulasi Hasil *Marshall* dengan Variasi Lignin

%Lignin	Density	VFWA	VITM	VMA	Stabilitas	Flow	MQ	KAO
0,0	2,26	68,7	6,02	19,23	1042	4,45	234,08	5,88
25,0	2,21	62,6	8,07	20,99	1321	3,50	377,40	5,88
50,0	2,13	52,1	11,46	23,90	1020	3,20	318,87	5,88
75,0	2,10	49,9	12,40	24,71	998	3,05	327,25	5,88
100,0	2,03	44,0	15,50	27,38	1146	3,80	301,59	5,88
Spek		≥ 65	≥ 3.0 - ≤ 5.0	≥15	≥ 800	≥ 2 - ≤ 4	≥ 250	

Berdasarkan pengujian *Marshall* dengan variasi lignin pada Tabel 9, setelah dianalisa dari tujuh parameter *marshall* dengan memanfaatkan lignin sebagai pengganti *filler* pada campuran aspal beton. Bahwa setiap penambahan 25% lignin pada campuran aspal beton cenderung meningkat pada parameter VITM dan VMA. Sementara itu untuk parameter stabilitas, *flow*, MQ, dan *density* cenderung mengalami penurunan namun hasil yang didapat tetap memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Sedangkan pada parameter VFWA dan VITM tidak ada variasi yang memenuhi standar sehingga lignin tidak direkomendasikan sebagai bahan pengganti *filler* pada campuran aspal beton.

Hal ini disebabkan karena penggunaan lignin sebagai bahan pengganti *filler* dalam campuran aspal beton menghadapi tantangan utama terkait kelarutan lignin sulfonat dalam air. Sebagaimana dilaporkan oleh (Anukam et al., 2021) lignin sulfonat mudah larut dalam pelarut seperti air, alkali encer, larutan garam, dan buffer, dengan tingkat kelarutan mencapai 80,68%. Hal ini menyebabkan sebagian besar lignin dapat larut dan hilang selama proses perendaman benda uji, sehingga mempengaruhi struktur dan kinerja campuran aspal. Untuk mengatasi masalah ini, lignin perlu dimodifikasi agar lebih tahan terhadap pelarut terutama air. Salah satu pendekatan yang direkomendasikan adalah melakukan modifikasi kimia pada lignin untuk meningkatkan sifat hidrofobitasnya. Metode seperti alkilasi dan esterifikasi terbukti efektif dalam mengurangi gugus hidroksil bebas pada lignin, sehingga meningkatkan ketahanannya terhadap pelarut dan memperkuat interaksi lignin dengan matriks aspal (Lisý et al., 2022). Selain itu, modifikasi seperti amination dan sulfonasi juga telah digunakan untuk meningkatkan homogenitas dan stabilitas lignin dalam aplikasi

beraspal (Gaudenzi et al., 2023). Studi menunjukkan bahwa lignin termodifikasi dapat meningkatkan viskositas dan ketahanan termal campuran aspal, serta menurunkan emisi gas saat proses pencampuran, meskipun perhatian tetap diperlukan terhadap performa pada suhu rendah (Zhang et al., 2024).

Dengan demikian, lignin yang telah dimodifikasi menjadi lebih hidrofobik dan stabil secara kimia merupakan syarat penting agar dapat berfungsi optimal sebagai *filler* dalam campuran aspal beton, terutama untuk memenuhi parameter *marshall* seperti stabilitas, *flow*, *densitas*, VMA, dan ketahanan terhadap air.

KESIMPULAN

Dengan substitusi lignin sebesar 25% pada campuran aspal beton cenderung meningkat pada parameter VITM dan VMA. Sementara itu untuk parameter stabilitas, *flow*, MQ, dan *density* cenderung mengalami penurunan namun hasil yang didapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Sedangkan pada parameter VFWA dan VITM tidak ada variasi yang memenuhi standar sehingga lignin tidak direkomendasikan sebagai bahan pengganti *filler* pada campuran aspal beton sehingga perlu dilakukan modifikasi lignin agar menjadi lebih hidrofobik dan stabil secara kimia.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, Y., Malik, A., & Sebayang, M. (2020). Analisa Kinerja Campuran AC-WC dengan Pemanfaatan Kombinasi Limbah Abu Bata dan Abu Serbuk Kayu Sebagai Filler. *Sainstek (e-Journal)*, 8(2), 70–80. <https://doi.org/10.35583/js.v8i2.122>
- Anukam, A., Berghel, J., Henrikson, G., Frodeson, S., & Ståhl, M. (2021). A review of the mechanism of bonding in densified biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148(August 2020), 111249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111249>
- Ayun, Q., & Prastyanto, C. A. (2021). Analisis Pengaruh Variasi Gradasi Aspal Porus Terhadap Parameter Marshall dan Permeabilitas. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19(1), 55. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v19i1.8482>
- Bakarbessy, D., & Pattireuw, Y. Y. (2019). Pemanfaatan Abu Bata Merah Sebagai Pengganti Filler Pada Campuran Aspal Beton (Laston). *Portal Sipil*, 8(1), 72–85.
- Besouw, G. venisia, Manoppo, M. R. E., & Palenewen, S. C. N. (2019). Pengaruh Modulus Kehalusan Agregat Terhadap Penentuan Kadar Aspal Pada Campuran Jenis Ac-Wc. *Jurnal Sipil Statik*, 7(4), 481–490.
- Bina, R. M., Syaruddin, Sahara, L. O., & Sayuti, M. (2023). Kandungan Selulosa, Hemiselulosa, dan Lignin Dalam Silase Ransum Komplit Dengan Taraf Jerami Sorgum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) yang Berbeda. *Gorontalo Journal of Equatorial Animals*, 2(1), 44–53. <https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/gijea/article/download/16368/6211>
- Chasanah, F., & Sukmo, T. A. (2023). Pengaruh Bubuk Talk Sebagai Bahan Filler Pengganti Pada Campuran Ac-Wc. *Ajie*, 07(September), 82–90. <https://doi.org/10.20885/ajie.vol7.iss3.art2>
- Fitri, S., Saleh, S. M., & Isya, M. (2018). Pengaruh Penambahan Limbah Plastik Kresek Sebagai Subsitusi Aspal Pen 60/70 Terhadap Karakteristik Campuran Laston Ac – Bc. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(3), 737–748. <https://doi.org/10.24815/jts.v1i3.10034>

- Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. *Construction and Building Materials*, 362(July 2022), 129773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773>
- Haurissa, P., Guntoro, S. D., Iqbal, Desembardi, F., & Saputra, A. (2025). Pengaruh Penggunaan Serbuk Bata Merah Sebagai Filler Terhadap Karakteristik Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC). *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 4(1), 44–51.
- Imannurohman, N., Sudarno, S., & Amin, M. (2020). Pemanfaatan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Perkerasan Laston Asphalt Concrete – Wearing Coarse (Ac-Wc). *Reviews in Civil Engineering*, 4(1), 6–14. <https://doi.org/10.31002/rice.v4i1.2215>
- Lisý, A., Ház, A., Nadányi, R., Jablonský, M., & Šurina, I. (2022). About Hydrophobicity of Lignin: A Review of Selected Chemical Methods for Lignin Valorisation in Biopolymer Production. *Energies*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/en15176213>
- Machsus, M., Chen, J. H., Hayati, D. W., Khoiri, M., Mawardi, A. F., & Basuki, R. (2021). Improvement for Asphalt Mixture Performance Using Plastic Bottle Waste. *International Journal of GEOMATE*, 20(79), 139–146. <https://doi.org/10.21660/2021.79.j2035>
- Ridwan, F. S., & Nadia. (2017). Analisis Pengaruh Pemanfaatan Abu Sekam Sebagai Filler Pada Campuran Aspal Beton. *Jurnal Konstruksia*, 8(2), 1–8.
- Rudi, R. (2023). Analisis Penggunaan Abu Batu Apung Sebagai Substitusi Filler Pada Campuran Aspal Panas Ac-Wc Dengan Variasi Perendaman. *Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.32662/gojise.v6i1.2714>
- Santoso, A. (2017). Pemanfaatan Lignin Kraft Dari Lindi Hitam Sebagai Perekat Kayu Komposit. *Sains Natural: Journal of Biology and Chemistry*, 1(2), 135–139. <https://doi.org/10.31938/jsn.v1i2.22>
- Setiati, R., Wahyuningrum, D., Siregar, S., & Marhaendrajana, T. (2020). Optimasi Pemisahan Lignin Ampas Tebu dengan Menggunakan Natrium Hidroksida. *Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 257–264.
- Sokanandi, A., Pari, G., Setiawan, D., & Saepuloh, S. (2014). Komponen Kimia Sepuluh Jenis Kayu Kurang Dikenal: Kemungkinan Penggunaan Sebagai Bahan Baku Pembuatan Bioetanol. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 32(3), 209–220. <https://doi.org/10.20886/jphh.2014.32.3.209-220>
- Susanto, H. A. (2020). Pengaruh Penggunaan Filler Pasir Besi Dan Semen Dalam Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, 21(1), 37. <https://doi.org/10.30595/techno.v21i1.7230>
- Tambunan, H. F., & Pitriani, F. (2019). Analisis Karakteristik Marshall Pada Laston AC-BC Dengan Penggunaan Bahan Zeolit Sebagai Filler. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 151–162. <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jft/article/view/6661>
- Tripoli, B., Kesuma, H., & Veranita. (2020). Analisis Karakteristik Campuran Aspal Beton Menggunakan Kombinasi Semen Dengan Cangkang Lokan Dan Sabut Kelapa Sebagai Filler. *Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 9, 1–9.
- Umindya, G., Tajalla, N., Humaira, S., Wahyu, A., & Putra, Y. (2019). *Pembuatan dan Karakterisasi Selulosa dari Limbah Serbuk Meranti Kuning (Shorea macrobalanos)*. 5(1), 142–147.
- Yue, X., Suopajärvi, T., Sun, S., Mankinen, O., Mikkelsen, A., Huttunen, H., Komulainen, S., Romakkaniemi, I., Ahola, J., Telkki, V. V., & Liimatainen, H. (2022). High-purity

lignin fractions and nanospheres rich in phenolic hydroxyl and carboxyl groups isolated with alkaline deep eutectic solvent from wheat straw. *Bioresource Technology*, 360(July). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127570>

Zhang, E., Liu, S., Shan, L., & Wang, Y. (2024). Mechanism analysis of Lignin's effect on Asphalt's resistance to moisture damage. *Journal of Cleaner Production*, 434(October 2023), 139425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139425>