

PEMANFAATAN LIMBAH ABU BATU BARA SEBAGAI PENGGANTI PASIR PADA CAMPURAN BERASPAL HRS-BASE

Riska Hawinuti^{1*}, Rifanie Gazalie², Tomy Isanto³

^{1,2,3} Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Banjarmasin, Indonesia

e-mail: [1*riskahawinuti@poliban.ac.id](mailto:riskahawinuti@poliban.ac.id) (corresponding author)

Abstrak

Berlimpahnya limbah batu bara yang dikenal dengan istilah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) memunculkan gagasan untuk mengelola limbah tersebut dengan teknologi tertentu agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan additif, salah satunya untuk campuran perkerasan aspal. Adanya PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang menyatakan bahwa FABA tidak lagi terdaftar pada kategori limbah B3, memberi peluang untuk pemanfaatan FABA sebagai substitusi semen, bahan campuran pada perkerasan, restorasi tambang dan sebagainya.

Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh limbah batu bara sebagai material substitusi pasir terhadap karakteristik HRS-Base, dimana Tingkat Kesiapterapan Teknologi penelitian ini adalah TKT 4. Pengujian material yang dilakukan adalah pengujian agregat, pengujian aspal dan pengujian campuran beraspal panas dengan alat Marshall menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2.

Hasil pengujian terhadap 4 sampel dengan formulasi campuran agregat kasar 15%, agregat sdang 13%, agregat halus 55%, pasir 10% dan Filler 7% diperoleh kadar aspal awal rencana 6,0% dengan nilai VIM sebesar 9,364%, VMA sebesar 20,04%, VFA sebesar 53,28%, Flow sebesar 4,7 mm, Stabilitas sebesar 1265,3 kg dan Marshall Qoutient (MQ) sebesar 269,2 kg/mm. Dimana VIM dan VFA belum memenuhi spesifikasi yang disyaratkan.

Kata kunci— HRS-Base, Limbah Batu Bara, Marshall

Abstract

The abundance of coal ash, also known as Fly Ash and Bottom Ash (FABA), has led to the idea of managing this waste using certain technologies in order to use as an additive mixtures. The Government Regulation Number 22 of 2021 which states that FABA is no longer listed as a hazardous and toxic waste (B3), provides an opportunity for the use of FABA as a substitute for cement, a mixture material in pavements, mine restoration and so on.

This research aims to determine the effect of coal ash as a sand substitution material on the characteristics of HRS-Base, where the Technology Readiness Level (TRL) of this research is TRL 4. The material tests carried out were aggregate testing, asphalt testing, and hot asphalt mixture testing with a Marshall apparatus according to the 2018 General Specifications for Civil Engineering, revision 2.

The results of testing on 4 samples with a mixture formulation of coarse aggregate 15%, medium aggregate 13%, fine aggregate 55%, sand 10%, and filler 7% obtained an initial asphalt content of 6,0% with VIM=9,364%, VMA=20,04%, VFA=53,28%, Flow=4,7mm, Stability=1265,3kg, and Marshall Qoutient (MQ)=269,2kg/mm. VIM and VFA did not meet the specified specifications.

Keywords— Coal Waste, HRS-Base, Marshall

History of article:

Received: 30 September 2023, Revised: 28 Juni 2024, Published: 30 Juni 2024

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Aspal merupakan salah satu material yang sering menjadi pilihan utama pada perkerasan jalan, dikarenakan hasil akhir yang dihasilkan baik dan nyaman bagi pengendara kendaraan. Salah satu hal yang patut menjadi perhatian selanjutnya adalah mahalannya harga aspal dibandingkan harga komponen penyusun campuran beraspal lainnya yang menyebabkan perlunya tindakan meminimalisir penggunaan bahan dasar aspal, namun tindakan mengurangi tersebut harus dikompensasikan dengan menambahkan bahan tambahan/ additif dalam campuran yang sifatnya mampu mengatasi kelemahan yang dimiliki aspal.

Salah satu bahan material yang sangat memungkinkan untuk dijadikan substitusi maupun additif terhadap campuran beraspal adalah material limbah batu baru, dimana Kalimantan sebagai salah satu penghasil batu bara dan sebagai pengguna aktif bahan bakar tersebut menghasilkan limbah buangan dengan jumlah berlimpah. Banyaknya limbah buangan hasil pembakaran batu bara tersebut menjadi momok tersendiri bagi perusahaan, masyarakat sekitar dan lingkungan hidup di daerah pembuangan limbah, dimana semakin hari, kebutuhan akan ruang atau lokasi untuk penimbunan limbah akan semakin meningkat dan membuka adanya kemungkinan limbah secara tidak sengaja mencemari tanah, sumber air dan udara. (Gazalie, Fauzi, Hawinuti, & Helmi, 2023)

Dengan keluarnya Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 mengenai yang menyebutkan bahwa FABA sebagai hasil akhir dari kegiatan pembakaran batu bara, tidak lagi terdaftar pada kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), memberikan peluang untuk pemanfaatan FABA setelah diolah dengan teknologi atau perlakuan tertentu sehingga dapat digunakan menjadi substitusi semen, bahan bangunan, bahan campuran pada perkerasan, restorasi tambang dan sebagainya. (Pemerintah Republik Indonesia, 2021)

Latar belakang inilah yang menjadi dasar pemanfaatan limbah abu batu bara dalam hal ini *bottom ash* sebagai substitusi dari material pasir pada dalam campuran aspal HRS-Base guna peningkatan nilai stabilitas, sekaligus salah satu langkah konkrit penanganan jumlah limbah dengan pemanfaatannya pada bidang konstruksi.

B. Tinjauan Pustaka

1) *Aspal*: Aspal sebagai material utama pada konstruksi lapis perkerasan lentur dengan tingkat ketahanan terhadap air yang tinggi, daya rekat material yang kuat, bersifat rekat dan mudah diaplikasikan di lapangan, dalam fungsinya sebagai campuran bahan pengikat agregat, memiliki beberapa kelebihan yaitu ketika dicampur dengan bahan agregat, fleksibilitasnya mudah dikendalikan. Dan kebal terhadap alkali, asam, dan garam.

Sebelum aspal minyak, aspal modifikasi, atau aspal alam digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran aspal, maka sifat-sifat fisis yang harus diuji terlebih dahulu antara lain penetrasi, viskositas, titik lembek, titik nyala, berat jenis, kemuluran, keawetan, dan kepekaan terhadap suhu. Sifat-sifat inilah yang mempengaruhi workabilitas, kinerja dan durabilitas campuran beraspal yang dihasilkan. (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017).

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal shell penetrasi 60/70 yang memiliki ketentuan/ syarat sebagai aspal keras penetrasi 60/70 dalam campuran sesuai Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, sebagaimana yang dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

TABEL 1. Ketentuan Aspal Keras Pen 60/70 dalam Campuran

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I.Aspal Pen.60-70
Penetrasi pada 25°C (dalam 0,1 mm)	SNI 2456-2011	60-70
Viskositas Kinematis 135°C (cSt)	ASTM D2170-10	≥ 300
Titik Lembek (dalam °C)	SNI 2434-2011	≥ 48
Daktalitas pada 25°C, (dalam cm)	SNI 2432-2011	≥ 100
Titik Nyala (dalam °C)	SNI 2433-2011	≥ 232
Kelarutan dalam <i>Tricholoethylene</i>	ASSTHO T44-14	≥ 99
Berat Jenis	SNI 2441-2011	≥ 1,0
Kadar Parafin Lilin (dalam %)	SNI-03-3639-2002	≤ 2

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2, 2020)

2) *Agregat*: Agregat merupakan salah satu komponen struktur perkerasan jalan yang terdiri dari sekumpulan butiran batu pecah yang terbuat dari pasir atau bahan galian lainnya, baik sebagai bahan alami maupun hasil pabrikan/buatan. Komponen utama struktur perkerasan jalan pada umumnya adalah agregat, yang menyumbang 90–95 persen berat atau 75–85 persen volume dari total

keseluruhan material. Agregat yang digunakan harus dipastikan dalam kondisi bersih dari kotoran, bahan-bahan organik atau bahan lain yang tidak dikehendaki, karena material-material tersebut akan mengurangi kinerja campuran. (BSN, 2008).

Untuk dapat memperoleh hasil maksimal, agregat kasar yang digunakan pada campuran aspal adalah material yang tertahan saringan No. 4 (4,75 mm) dimana kondisi agregat yang diharapkan adalah bersih, keras, awet dan dilakukan dalam kondisi basah, serta tidak terdapat unsur lempung atau unsur pencampur lain yang tidak diinginkan serta harus memenuhi ketentuan nilai spesifikasi sesuai Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, yang ditampilkan pada tabel 2 berikut.

TABEL 2. Nilai Ketentuan Agregat Kasar

Pengujian	Metode Pengujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan	Natrium sulfat	Maks. 12%
	Magnesium sulfat	Maks. 18%
Abrasi dengan mesin	Campuran AC Modifikasi dan SMA	Maks. 6%
	putaran 100 500	Maks. 30%
Los Angeles	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	Maks. 8%
	putaran 100 500	Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439: 2011	Min. 95%
Butir Pecah pada Agregat Kasar	SMA	SNI 7619 : 100/90 *)
	Lainnya	2012 95/90 **)
Partikel Pipih dan Lonjong	SMA	SNI 8287 : Maks. 5%
	Lainnya	Perbandingan Maks. an 1:5 10%
Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2, 2020)

Secara umum, agregat halus merupakan material pasir atau output dari penyaringan batu pecah yang terdiri dari bahan lolos saringan No.4 (4,75 mm). Kondisi agregat halus yang diharapkan adalah harus terdiri dari bahan yang kondisi bersih dan tanpa ada unsur lempung atau unsur organik lainnya. Batasan penggunaan pasir alam sebagai material campuran aspal adalah < 15% berat total campuran, dimana disyaratkan agregat halus

tersebut harus memenuhi ketentuan nilai spesifikasi sesuai Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, sebagaimana yang ditampilkan pada tabel 3 berikut.

TABEL 3. Nilai Ketentuan untuk Agregat Halus

Pengujian	Metode Pengujian	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Uji Kadar Rongga Tanpa Pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45
Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
Agregat Lolos Ayakan No. 200	SNI ASTM C117 : 2012	Maks. 10%

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2, 2020)

3) *Bahan pengisi (filler)*: *filler* yang ditambahkan (*filler added*) dapat berupa debu batu kapur magnesium atau kapur atau dikenal dengan istilah *limestone dust* atau debu kapur padam atau dolomit yang sesuai dengan AASTHO M303-89 (2014) atau semen atau abu terbang tipe C dan F. Untuk aspal pen 60-70, diizinkan untuk menambahkan semen sebagai bahan pengisi. Kondisi fisis *filler* yang diharapkan adalah dalam keadaan kering sempurna, bersih dari penggumpalan serta jika diuji menurut panduan SNI ASTM C136:2012 harus mengandung $\geq 75\%$ bahan yang lolos saringan No. 200 (dengan ukuran 75 mikron), jika dibandingkan dengan total beratnya. Jumlah *filler* yang ditambahkan (*filler added*) pada material semen harus berada dalam *range* 1 - 2% terhadap berat total agregat dan untuk bahan pengisi lainnya harus berada dalam *range* 1 - 3% terhadap berat total agregat kecuali SMA. Khusus untuk SMA, penggunaan semen sebagai *filler*, tidak diperkenankan. (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020).

4) *Hot Rolled Sheet (HRS)*: HRS atau bisa disebut dengan istilah Lataston, berdasarkan bentuk dan letaknya terdiri dari dua yaitu HRS Fondasi (*HRS-Base*) dan HRS Lapis Aus (*HRS Wearing Course, HRS-BASE*) dengan ukuran maksimum agregat campuran masing-masing adalah 19 mm. HRS-WC memiliki proporsi fraksi agregat yang lebih kecil dari HRS-Fondasi. Untuk memperoleh hasil yang maksimal, maka campuran aspal harus didesain untuk sesuai spesifikasi dengan gradasi yang benar-benar senjang.

5) *Gradasi Agregat Campuran*: Gradasi agregat campuran merupakan distribusi variasi ukuran butir agregat, dimana seluruh partikel agregat yang akan digunakan dalam campuran aspal harus berada dalam rentang ukuran tertentu dan telah ditentukan proporsi masing-masing sesuai ukuran partikelnya. Besarnya rongga antar butir yang ditentukan oleh gradasi agregat yang diberikan, akan memberikan pengaruh pada stabilitas dan kemudahan dalam pelaksanaan pekerjaan perkerasan aspal. Gradasi agregat sangat mempengaruhi kualitas campuran aspal itu hingga harus ditentukan berapa nilai batasan dalam masing-masing jenis gradasi yang dikenal dengan batas atas dan batas bawah, dimana gradasi agregat gabungan tersebut harus memenuhi batasan persentase berat lolos terhadap total agregat untuk HRS sesuai Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, sesuai tabel 4 berikut.

TABEL 4. Gradasi Agregat Gabungan untuk Campuran Aspal

Ukuran Ayakan	% Berat yang Lolos terhadap Total Agregat	Lataston (HRS)	
		WC	Base
ASTM (mm)			
¾"	19	100	100
½"	12,5	90 – 100	90 – 100
3/8"	9,5	75 – 85	65 – 90
No.4	4,75		
No.8	2,36	50 – 72	35 – 55
No.16	1,18		
No.30	0,600	35 – 60	15 – 35
No.50	0,300		
No.100	0,150		
No.200	0,075	6 – 10	2 – 9

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2, 2020)

Metode yang digunakan untuk pengolahan campuran agregat pada penelitian ini adalah dengan menggunakan metode “*trial and error*” dimana cara kerjanya adalah dengan melakukan beberapa kali percobaan hingga diperoleh hasil yang mendekati atau sama dengan tujuan penelitian. Prinsip kerja yang harus diperhatikan peneliti adalah peneliti wajib memahami syarat yang menjadi batas gradasi, menginputkan data spesifikasi gradasi, persentase lolos saringan tiap-tiap fraksi dan nilai spesifikasi ideal pada kolom data sesuai peruntukannya masing-masing. Apabila sudah mencapai syarat gradasi gabungan yang paling ideal, maka data tersebut yang akan digunakan sebagai campuran beraspal panas sebagai perkerasan jalan.

6) *Abu Batu Bara*: Pengelolaan dan pengolahan lanjutan untuk material abu batu bara atau dikenal dengan istilah *fly ash and bottom ash* (FABA), yang diatur berdasarkan Spesifikasi Khusus SKh-1.5.15 membagi material FABA menjadi 2 bagian yaitu *fly ash* sebagai produk sisa berupa material-material yang 'terbang' dan *bottom ash* sebagai produk sisa yang 'terendapkan', di bagian bawah. Sebagai hasil akhir dari pembakaran batu bara dengan suhu tinggi pada unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), FABA yang dihasilkan, dicampur dengan komposisi tertentu baik yang langsung berasal dari tungku pembakaran atau yang diambil dari lokasi penyimpanan (*ash pond*). Abu terbang sebagai hasil pembakaran batu bara adalah material dengan ukuran butir halus yaitu $\leq 4,75$ mm atau lolos saringan No. 4, sedangkan *bottom ash* merupakan hasil pembakaran batu bara yang mempunyai ukuran butiran lebih besar dan terendap di bagian dasar tungku pembakaran mempunyai ukuran butiran yang kasar sebesar $\leq 37,5$ mm atau lolos saringan No. 1,5. (Direktorat Jenderal Bina Marga, Timbunan Pilihan dan Lapis Fondasi Menggunakan Abu Batu bara/ Fly Ash dan Bottom Ash (FABA), 2022)

TABEL 5. Ketentuan Sifat-sifat Campuran Lataston

Sifat-sifat Campuran	Lataston	
	Lapis Aus	Lapis Fondasi
Kadar aspal efektif, dalam satuan %	Min 5,9	5,5
Jumlah tumbukan per bidang	50	
Rongga dalam campuran dalam satuan %	Min. 3,0	Maks. 5,0
Rongga dalam Agregat (VMA) dalam satuan %	Min. 17	17
Rongga terisi aspal, dalam satuan %	Min. 68	
Stabilitas Marshall, dalam satuan Kg	Min. 600	
Marshall Quotient, dalam satuan Kg/mm	Min. 250	
Nilai Stabilitas Marshall Sisa (dalam satuan %) setelah dilakukan perendaman 24 jam, 60°C	Min. 90	

Sumber: (Direktorat Jenderal Bina Marga, Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2, 2020)

7) *Uji Marshall*: Alat Marshall adalah alat yang digunakan untuk menguji campuran beraspal panas. Alat ini digunakan untuk mengukur stabilitas dan aliran (*flow*) dari suatu campuran aspal dengan agregat ukuran maksimum 2,54 cm. Uji ini dilakukan dengan mengukur beban maksimum yang dapat dipikul benda

uji sebelum hancur (stabilitas) dan deformasi permanen dari suatu benda uji sebelum hancur (*flow*). Parameter yang digunakan untuk menilai suatu benda uji berdasarkan uji Marshall adalah nilai stabilitas, nilai *flow* dan nilai *Marshall Quotient*. Standar digunakan sebagai acuan dalam pengujian campuran beraspal panas dengan alat Marshall adalah RSNI M-01-2003. (Balitbang PU, 2003).

Ketentuan batasan nilai untuk sifat-sifat campuran aspal Lataston/ HRS sesuai ketentuan pada Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, disajikan pada Tabel 5..

C. Review Literatur

Penelitian sebelumnya yang menjadi acuan penelitian ini antara lain:

1) Menurut (Anshar, Saleh, & Fisaini, 2023): “Pada penggunaan *coal bottom ash* sebagai substitusi agregat halus dengan persentase 0%, 5%, 10% diperoleh suatu kesimpulan bahwa nilai Stabilitas dan MQ akan menurun seiring bertambahnya persentase *coal bottom ash*. Sedangkan nilai *flow* (kelelahan) benda uji mengalami peningkatan dari dengan bertambahnya persentase *coal bottom ash*”.

2) Menurut (Sujatmiko, Robby, & Elvina, 2022): ” Dengan menggunakan variasi kadar aspal 5,5%; 6%; 6,5%; 7% dan 7,5% dan berdasarkan hasil pemeriksaan sifat-sifat fisik agregat, dapat dinyatakan bahwa semuanya material memenuhi persyaratan spesifikasi. Dari hasil pengujian Marshall dapat ditentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 6,05%. Nilai karakteristik *Marshall* yang didapat dari KAO tersebut yaitu stabilitas sebesar 862,5kg, VMA sebesar 17,65%, VIM sebesar 3,8%; VFB sebesar 78% dan MQ sebesar 295,5kg/mm”.

3) Menurut (Zulfikar, 2021): ”Dengan benda uji yang memiliki 3 variabel dengan kadar agregat halus 100% pasir; agregat halus 75% pasir dan 25% abu batu bara dan 50% pasir dan 50% abu batu bara dimana kadar aspal masing-masing adalah dalam rentang 5% - 7%. Selanjutnya dilakukan *Marshall test* terhadap benda uji dan mendapatkan hasil terbaik jika dibandingkan dengan variabel agregat halus 100% pasir yaitu pada variabel 75% pasir dan 25% abu batu bara, dengan kadar aspal sebesar 6,5% menunjukkan nilai stabilitas sebesar 1.604,39 kg, nilai *flow* 2,58 mm dan menghasilkan (MQ) sebesar 653,37 kg/mm dimana terdapat nilai VIM tidak memenuhi syarat”.

4) Menurut (Riyanto & Prasetya, 2020) : ” Aspek Properties Marshall selain stabilitas dan MQ pada

campuran pasir sungai maupun campuran pasir pantai dengan filler fly ash memiliki perbedaan yang tidak signifikan. Penambahan *filler fly ash* dalam campuran pasir pantai dapat meningkatkan stabilitas dan MQ campuran tersebut. Kadar *filler* optimum 3,3%. Dari persamaan garis trendline didapatkan nilai Properties Marshall sebagai berikut, Stabilitas 1196,99 kg, flow 2,32 mm, VFWA 66,74 %, VMA 15,01 %, VIM 4.99 %, dan MQ 516,74 kg/mm.

5) Menurut (Bianglala, 2020): “Variasi yang digunakan dengan perbandingan agregat halus: *bottom ash*, yaitu (100%:0%), (92,5%:7,5%), (85%:15%), (77,5%:22,5%), (70%:30%). Dimana hasil pengujian menunjukkan kadar aspal optimum (KAO) setiap variasi *bottom ash* 0%; 7,5%; 15%; 22,5%; dan 30% adalah 6%; 6%; 5,8%; 5,8%; 5,8%. Pada perendaman standar variasi *bottom ash* 0%; 7,5%; 15%; 22,5% dan 30% dicapai nilai stabilitas campuran sebesar 2823,706 kg; 2710,294 kg; 3020,796 kg 2916,057 kg dan 2843,981 kg dan nilai indeks kekuatan sisa adalah 94,677 %; 95,492 %; 96,667 %; 91,302 % dan 90,479 %. Hasil penelitian menunjukkan agregat halus dapat disubstitusikan dengan *bottom ash* dengan prosentase optimum sebesar 15%.

6) Menurut (Gusman & Ansyori, 2014): ” Pengganti parsial agregat halus dengan *bottom ash* batubara dibuat dengan variasi 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% dan 35% dari total proporsi agregat halus. Hasil penelitian mencatat bahwa penggunaan *bottom ash* batu bara umumnya meningkatkan kualitas campuran latasir B. Latasir campuran B yang memiliki karakteristik *Marshall* terbaik adalah berdasarkan kadar abu batu bara dari 17,2 %.

Keterkaitan hasil penelitian terdahulu dengan penelitian ini adalah adanya kesamaan standar pengujian, bahan material yang diteliti namun metode dan campuran yang berbeda, sehingga asumsi hasil penelitian tersebut akan terlihat suatu pola kesamaan dan atau perbedaan, sesuai dengan tujuan penelitian, dalam hal ini adalah kesamaan material berupa limbah batu bara dan material yang di substitusi yaitu agregat halus dengan beragam variasi campuran yang berbeda untuk memperoleh suatu campuran beraspal dengan hasil pengujian Marshall terbaik.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemakaian limbah abu batu bara dalam hal ini

limbah *bottom ash* sebagai substitusi material pasir pada campuran aspal Lataston Lapis Fondasi (HRS-Base).

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur, Uji Bahan dan Batuan, Politeknik Negeri Banjarmasin.

B. Sumber Material

Sumber material yang digunakan dalam pengujian ini antara lain:

1) *Agregat kasar dan medium*: dari Awang Bangkal diperoleh dari AMP PT. Adimanunggal Cipta Padunusa.

2) *Agregat halus*: berupa abu batu yang diperoleh dari Desa Awang Bangkal dan agregat halus yang berupa pasir alam berasal dari Sungai Barito, diperoleh dari AMP PT. Adimanunggal Cipta Padunusa.

3) *Bahan pengikat*: berupa aspal pertamina dengan penetrasi 60/70.

4) *Bahan tambahan*: berupa limbah *bottom ash* dari daerah Buhut, Timpah, Kabupaten Kapuas, Provinsi Kalimantan Tengah.

C. Instrument Penelitian

Pada penelitian ini adapun instrument utama yang digunakan adalah sebagai berikut:

1) *Cara Uji Pemeriksaan Agregat* terdiri dari alat uji berat jenis dan penyerapan (untuk pengujian Agregat Halus: piknometer, cetakan kerucut, batang penumbuk, oven dan peralatan pendukung lainnya. Agregat Kasar: tangki air, alat penggantung dan saringan No.4, timbangan dan wadah contoh uji.). Uji analisa saringan dengan peralatan berupa satu set saringan dan mesin pengguncang saringan, oven dan peralatan pendukung lainnya. Uji keausan agregat dengan peralatan utama yaitu mesin *Los Angeles* dan bola-bola baja serta peralatan pendukung lainnya.

2) *Metode untuk Pemeriksaan Nilai Berat Jenis dan Nilai Penyerapan Air pada Agregat*. Menggunakan peralatan antara lain: alat uji berat jenis dan penyerapan (untuk pengujian Agregat Halus: cetakan kerucut, batang penumbuk, piknometer, oven dan peralatan penunjang lainnya. Agregat Kasar: timbangan, wadah contoh uji, tangki air, alat penggantung dan ayakan No.4). Uji analisa saringan dengan peralatan berupa satu set saringan dan mesin pengguncang saringan, oven dan peralatan pendukung lainnya. Uji keausan agregat

dengan peralatan utama yaitu mesin *Los Angeles* dan bola-bola baja serta alat pendukung lainnya.

3) *Metode Uji Karakteristik Campuran Aspal*. Menggunakan peralatan uji berupa cetakan benda uji, mesin penumbuk manual atau otomatis, *extruder*, alat untuk pengujian *Marshall*, oven, *waterbath*, timbangan termometer dan peralatan penunjang lainnya.

D. Standar Pengujian

Standarisasi pengujian yang menjadi acuan atau panduan dalam penelitian ini antara lain:

1) *Pengujian Agregat*, dilaksanakan dengan SNI 2417:2008 untuk Metode Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi *Los Angeles*; SNI 1970:2016 untuk Pengujian Berat Jenis dan Besaran Penyerapan Air Agregat Halus; SNI 1969:2016 untuk Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar.

2) *Pengujian Material Aspal*, dilakukan dengan SNI 2434:2011 yaitu Metode Pengujian Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola; SNI 2441:2011 yaitu Metode Pengujian Berat Jenis Aspal Keras; SNI 2432:2011 yaitu Metode Pengujian Daktilitas Aspal; dan SNI 2456:2011 yaitu Metode Pengujian Penetrasi Aspal; dan

3) *Pengujian campuran beraspal panas* dengan RSNI M-01-2003 yaitu Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat *Marshall*.

E. Pelaksanaan Pengujian

1) *Tahap Persiapan*: Pada tahap ini yang dilakukan adalah menyiapkan bahan dan pengecekan alat-alat yang akan digunakan untuk melakukan pengujian

2) *Pengujian Bahan Material*: Pada tahap ini dilakukan pengujian untuk agregat dan pengujian aspal.
i) Pengecekan material agregat. Jenis pengujian yang dilakukan untuk agregat kasar adalah uji berat jenis dan penyerapan agregat kasar, uji keausan dengan mesin *Los Angeles* dan analisa saringan agregat kasar sedangkan untuk agregat halus pengujian yang dilakukan adalah uji berat jenis dan penyerapan agregat halus dan analisa saringan agregat halus. Pengujian dilakukan dengan memasukkan benda uji dan bola-bola baja secara bersama-sama ke dalam mesin abrasi *Los Angeles*;

ii) Pengujian Aspal Penetrasi 60/70. Jenis pengujian yang dilakukan untuk aspal penetrasi 60/70 adalah uji penetrasi pada suhu 25°C, uji titik lembek aspal, uji daktilitas pada suhu 25°C, uji penetrasi aspal pada suhu 25°C dan uji berat jenis aspal;

3) *Perencanaan Campuran:*

- i) Pengujian analisa saringan digunakan untuk gradasi campuran HRS-Base dimana perencanaan campuran beraspal ini dilakukan dengan mengatur proporsi campuran berdasarkan data presentase lolos analisa saringan agregat kasar dan agregat halus agar masuk berada di antara “batas atas” dan “batas bawah” pada tiap ukuran saringan. Proporsi campuran untuk penelitian ini didapatkan dengan cara *trial and error*.
- ii) Menghitung perkiraan awal kadar aspal optimum campuran aspal HRS-Base untuk mendapatkan perkiraan awal kadar aspal optimum dengan menggunakan persamaan 1 berikut.

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%FF) + \text{Konstanta} \quad (1)$$

Dimana CA merupakan persentase agregat kasar, FA merupakan persentase agregat halus, FF merupakan persentase bahan pengisi dan konstanta dengan nilai 0,5 – 1 untuk Laston dan 1 –2 untuk Lataston.

Setelah didapatkan hasil perhitungan perkiraan awal nilai kadar aspal optimum, maka nilai tersebut yang dijadikan kadar aspal optimum (KAO) pada perhitungan selanjutnya.

4) *Penyiapan dan Pembuatan Benda Uji Aspal dengan dan tanpa campuran Bottom Ash Batu Bara.*

- i) Menyiapkan benda uji aspal dengan aspal murni yang akan digunakan dalam campuran berdasarkan kadar aspal optimum (KAO).
- ii) Pembuatan benda uji tanpa campuran *bottom ash* batu bara sebanyak 4 buah benda uji dengan KAO 6%.
- iii) Pembuatan benda uji dengan campuran *bottom ash* batu bara sebanyak 4 buah benda uji dengan KAO 6%.

5) *Pengujian Marshall Benda Uji:* berupa pengujian kepadatan campuran, pengujian stabilitas dan pengolahan data uji Marshall (nilai stabilitas dan *flow*, selanjutnya dapat dihitung nilai parameter lainnya, yaitu VIM, VMA, VFB, berat volume, *Marshall Quotient* dan parameter lainnya yang sesuai dengan spesifikasi campuran). Setelah itu, hasil perhitungan akan dibandingkan dengan batasan/ nilai pada ketentuan sifat-sifat campuran Lataston pada Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan revisi 2.

F. *Flow Chart atau Diagram Alir Penelitian*

Flow chart atau Diagram alir pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 (Terlampir).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian material dan perhitungan data yang dilakukan di laboratorium disajikan pada bagian dibawah ini.

A. Hasil Pemeriksaan Agregat

II. TABEL 6. Hasil Pengujian Agregat Kasar ^{3/4}

Karakteristik	Standar Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi
Berat Jenis Bulk	SNI 1969-2008	gram/cm ³	2,596	Min. 2,5
Berat Jenis Permukaan Jenuh	SNI 1969-2008	gram/cm ³	2,632	Min 2,5
Berat Jenis Semu	SNI 1969-2008	gram/cm ³	2,693	Min. 2,5
Penyerapan Air	SNI 1969-2008	%	1,384	Maks. 3
Abrasi dengan Mesin Los Angeles	SNI 2417-2008	%	18,750	Maks. 40%

III. Sumber: Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat 2023

1) *Hasil Pengujian terhadap Material Agregat Kasar (Coarse Aggregate):* Berdasarkan pemeriksaan diperoleh hasil untuk material agregat kasar batu pecah ^{3/4} seperti yang disajikan pada tabel 6.

2) *Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar (Medium Aggregate):* Berdasarkan hasil pemeriksaan diperoleh hasil untuk agregat kasar batu pecah ^{3/8} seperti yang disajikan pada tabel 7 berikut.

TABEL 7. Hasil Pengujian Agregat Kasar ^{3/8}

Karakteristik	Standar Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi
Berat Jenis Bulk	SNI 1969-2008	gram/cm ³	2,525	Min. 2,5
Berat Jenis Permukaan Jenuh	SNI 1969-2008	gram/cm ³	2,583	Min 2,5
Berat Jenis Semu	SNI 1969-2008	gram/cm ³	2,680	Min. 2,5
Penyerapan Air	SNI 1969-2008	%	2,297	Maks. 3
Abrasi dengan Mesin Los Angeles	SNI 2417-2008	%	18,750	Maks. 40%

Sumber: Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat 2023

3) Hasil Pemeriksaan pada Agregat Halus Abu Batu: Berdasarkan hasil pemeriksaan diperoleh hasil untuk agregat halus abu batu seperti yang disaji pada tabel 8 berikut

TABEL 8. Hasil Pengujian Agregat Halus Abu Batu

Karakteristik	Standar Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi
Berat Jenis Bulk	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,504	Min. 2,5
Berat Jenis Permukaan Jenuh	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,543	Min 2,5
Berat Jenis Semu	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,605	Min. 2,5
Penyerapan Air	SNI 1970-2008	%	1,556	Maks. 3

4) Hasil Pengujian terhadap Agregat Halus Pasir Barito: Berdasarkan hasil pemeriksaan diperoleh hasil untuk agregat halus berupa pasir Barito disajikan sesuai tabel 9 berikut.

TABEL 9. Hasil Pengujian Agregat Halus Pasir Barito

Karakteristik	Standar Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi
Berat Jenis Bulk	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,617	Min. 2,5
Berat Jenis Permukaan Jenuh	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,627	Min 2,5
Berat Jenis Semu	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,643	Min. 2,5
Penyerapan Air	SNI 1970-2008	%	0,372	Maks. 3

5) Hasil Pemeriksaan Bottom Ash: Berdasarkan hasil pemeriksaan diperoleh hasil untuk bottom ash seperti yang disajikan pada tabel 10 berikut.

TABEL 10. Hasil Pengujian Bottom Ash

Karakteristik	Standar Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi
Berat Jenis Bulk	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,332	-
Berat Jenis Permukaan Jenuh	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,430	-
Berat Jenis Semu	SNI 1970-2008	gram/cm ³	2,585	-
Penyerapan Air	SNI 1970-2008	%	0,042	-

Khusus untuk material bottom ash, hasil pengujian tidak dilakukan perbandingan dengan spesifikasi yang disyaratkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga tahun

2018 (Revisi 2), hal ini dikarenakan Bottom Ash sebagai limbah dari batu bara tidak ada dibahas/ tidak tidak masuk dalam Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018 (Revisi 2). Sehingga tidak ada batasan nilai untuk spesifikasinya.

A. Pengujian Aspal

Pengujian aspal dilakukan untuk mengetahui apakah material aspal tersebut memenuhi karakteristik yang diminta pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2). Berdasarkan hasil pemeriksaan dan pengujian aspal berdasarkan SNI terkait, diperoleh nilai-nilai sebagaimana pada tabel 11 berikut.

TABEL 11. Hasil Pengujian Aspal

Karakteristik	Standar Pengujian	Satuan	Hasil	Spesifikasi
Penetrasi	SNI 2456:2011	mm	65,625	60-70
Titik Lembek	SNI 2434:2011	°C	49	≥ 48
Berat Jenis Aspal	SNI 2441:2011	g/cm ³	1,0124	≥ 1,0

B. Persen Lolos Agregat

Pada pengujian agregat yang telah dilaksanakan untuk agregat kasar (CA), agregat medium (MA), abu batu (FA), pasir (S) dan Bottom Ash didapatkan persen lolos saringan yang dapat dilihat pada tabel 12 berikut.

TABEL 12. Persen Lolos Agregat

Nomor Saringan		Persen Lolos (%)				
mm	inci	CA	MA	FA	S	FillerF
19,00	3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,70	1/2"	35,94	100,00	100,00	100,00	100,00
9,52	3/8"	5,12	100,00	99,46	100,00	100,00
2,38	No. 8	1,60	7,21	60,53	100,00	100,00
0,600	No. 30	0,83	2,70	14,26	5,20	100,00
0,075	No.200	0,22	1,51	1,08	1,49	97,56
	Pan	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

C. Hasil Analisa Saringan

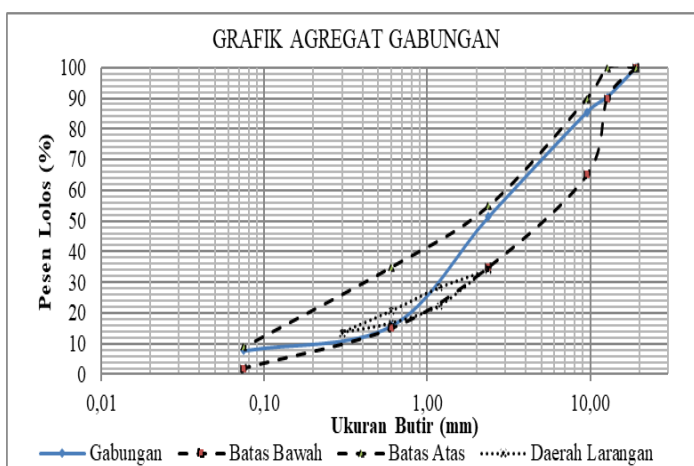
1) Penggabungan Fraksi Agregat Normal: Dari hasil penggabungan agregat normal sesuai spesifikasi dibuat dengan metode Trial Error atau dilakukan dengan cara coba-coba. Metode Trial and Error dipakai apabila proporsi campuran pada agregat yang lebih mendekati nilai tengah sesuai dengan spesifikasi. Nilai tengah pada penggabungan fraksi agregat didapat dari batas atas dan batas bawah sesuai dengan spesifikasi gradasi agregat tersebut. Dari nilai tersebut didapat

proporsi campuran agregat yaitu, CA 15%, MA 13%, FA 55%, S 10% dan *Filler* 7%. Dari hasil penggabungan agregat normal tersebut digunakan sebagai campuran aspal HRS-Base karena memenuhi spesifikasi.

Untuk nilai proporsi campuran agregat gabungan dan grafik gradasi agregat gabungan dapat dilihat pada tabel 13 dan gambar 2 berikut.

TABEL 13. Proporsi Campuran Agregat Gabungan

Nomor Saringan	Kombinasi (%)					Gabungan 100	Spesifikasi Batas	
	15,0	13,0	55,0	10,0	7,0		Bawah	Atas
mm	inci	CA	MA	FA	S	Filler		
19	3/4"	15,00	13,00	55,00	10,00	7,00	100,0	100
12,7	1/2"	5,39	13,00	55,00	10,00	7,00	90,4	100
9,52	3/8"	0,77	13,00	54,70	10,00	7,00	85,5	90
2,30	No. 8	0,24	0,94	33,29	10,00	7,00	51,5	55
0,6	No. 30	0,12	0,35	7,84	0,52	7,00	15,8	35
0,075	No.200	0,03	0,20	0,59	0,15	6,83	7,8	2
	Pan	0,00	0,00		0,00	0,00		



Gambar 2. Grafik Gradasi Agregat

Dari grafik diatas dengan proporsi agregat halus lebih banyak maka didapatkan hasil Agregat Gabungan yang memenuhi amplop gradasi untuk lapis HRS-Base.

2) *Perhitungan Perkiraan Kadar Aspal Awal Rencana*: Perkiraan awal kadar aspal optimum untuk campuran aspal terlebih dulu menghitung dengan persamaan 1 dan data masukkan berasal dari tabel 13.

Keterangan :

- i. Nilai CA = Agregat Kasar tertahan saringan nomor 8 yaitu 100 % - % gabungan lolos saringan nomor 8.
CA= 100% - 51,5% = 48,5%

- ii. FA = Agregat Halus lolos saringan nomor 8 yaitu % lolos saringan nomor 8 - % gabungan lolos saringan nomor 200.

$$FA = 48,5\% - 7,8\% = 40,7\%$$

- iii. FF = Bahan Pengisi (*Filler*) hasil % lolos saringan nomor 200.

$$FF = 7,8\%$$

- iv. Konstanta = 1 sampai 2 untuk lapis Lataston Sehingga diperoleh perkiraan awal kadar aspal optimum sebagai berikut.

$$Pb = (0,035 \times 48,5\%) + (0,045 \times 40,7\%) + (0,18 \times 7,8\%) + 1 = 5,933\% \approx 6,0\%$$

Dengan variasi kadar aspal 6,0% (4 buah sampel untuk variasi pasir dan 4 untuk buah sampel untuk variasi limbah) dan berat bahan 1 benda uji *marshall* (agregat + aspal) = 1200 gram.

D. Penentuan Besaran Nilai Kadar Aspal Optimum

Penentuan besaran nilai kadar aspal optimum diasumsikan adalah sama dengan perkiraan awal kadar aspal optimum yaitu sebesar 6,00%.

E. Perhitungan Marshall

Setelah mendapatkan kadar aspal optimum (KAO), selanjutnya membuat benda uji, baik itu yang tanpa campuran limbah batu bara dan benda uji dengan tambahan limbah batu bara. Perhitungan *Marshall*nya dapat dilihat pada tabel 14 dan 15 (Terlampir).

F. Hasil Pengujian Marshall

Pada tabel 16 dan 17 berikut, disajikan hasil pengujian *Marshall* tanpa limbah abu batu bara dan hasil pengujian *Marshall* dengan tambahan limbah abu batu bara pada KAO 6,0%.

TABEL 16. Hasil Pengujian Marshall Test tanpa Limbah Batu Bara pada KAO 6,0%

Sifat-Sifat Campuran	Lapis HRS - Base			
	Hasil	Spesifikasi	Ket	
Jumlah Tumbukan Perbidang	-	50	50	Memenuhi
Rongga dalam Campuran (%) (VIM)	Min.	5,0	3	Memenuhi
	Maks.		5	
Rongga dalam Agregat (%) (VMA)	Min.	17,02	17	Memenuhi
Rongga Terisi Aspal (VFA) (%)	Min.	70,63	68	Memenuhi
Pelelehan (mm)	Min	5,30	3,0	Memenuhi
Stabilitas Marshall (Kg)	Min.	1.325,5	600	Memenuhi
Marshall Quotient (Kg/mm)	Min.	250,1	250	Memenuhi

TABEL 17. Hasil Pengujian Marshall Test dengan Limbah Batu Bara pada KAO 6,0%

Sifat-Sifat Campuran	Lapis HRS - Base			Ket
	Hasil	Spesifi	kasi	
Jumlah Tumbukan Perbidang	-	50	50	Memenuhi
Rongga dalam Campuran (%) (VIM)	Min. Maks.	9,364	$\frac{3}{5}$	Tidak Memenuhi
Rongga dalam Agregat (%) (VMA)	Min.	20,04	17	Memenuhi
Rongga Terisi Aspal (VFA) (%)	Min.	53,28	68	Tidak Memenuhi
Pelelehan (mm)	Min	4,7	3,0	Memenuhi
Stabilitas Marshall (Kg)	Min.	1.265,3	600	Memenuhi
Marshall Quotient (Kg/mm)	Min.	269,2	250	Memenuhi

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2023)

G. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* pada tabel 16 dan 17 diatas, penambahan limbah abu batu bara pada KAO 6,0% mampu memberikan karakteristik HRS-Base yang baik, Dimana nilai VMA, Pelelehan, Stabilitas Marshall dan *Marshall Quotient* masih memenuhi spesifikasi.

Terdapat 2 sifat campuran yang tidak memenuhi spesifikasi yaitu VIM dan VFA. Dimana dengan campuran limbah pada KAO 6%, nilai VIM adalah sebesar 9,364% yang menggambarkan bahwa campuran yang terbentuk memiliki rongga udara yang besar, sehingga campuran menjadi kurang rapat/ kedap terhadap air maupun udara. Hal ini berakibat campuran aspal akan menjadi *porrus* sehingga berakibat jumlah aspal akan berkurang lebih cepat dan mengurangi sifat keawetan aspal.

Dengan nilai VMA sebesar 53,28% yang menggambarkan bahwa campuran yang terjadi memiliki daya ikat aspal yang kurang, dimana rongga yang ada cukup besar. Kecedapan perkerasan akan semakin kecil, karena air dan udara akan mengoksidasi aspal dalam campuran sehingga keawetan campuran berkurang dan stabilitasnya rendah.

Dikarenakan nilai VIM dan VMA yang tidak memenuhi syarat spesifikasi tersebut, maka substitusi pasir dengan limbah batu bara secara keseluruhan tidak boleh dilakukan.

IV. KESIMPULAN

Dari pembahasan diatas, pengaruh limbah abu batu bara sebagai pengganti agregat halus pada campuran aspal Lataston Lapis Fondasi (HRS-Base) dengan KAO sebesar 6,0% pada variasi agregat tertentu diperoleh kesimpulan bahwa penggunaan limbah abu batu bara hanya memenuhi syarat spesifikasi pada VMA, Pelelehan, Stabilitas Marshall dan Marshall Quotient, namun nilai VIM dan VTA tidak memenuhi, sehingga penggunaan limbah abu batu bara dengan asal dari Desa Buhut dengan variasi campuran limbah seperti yang diteliti pada laporan ini adalah tidak disarankan.

UCAPAN TERIMAKASIH

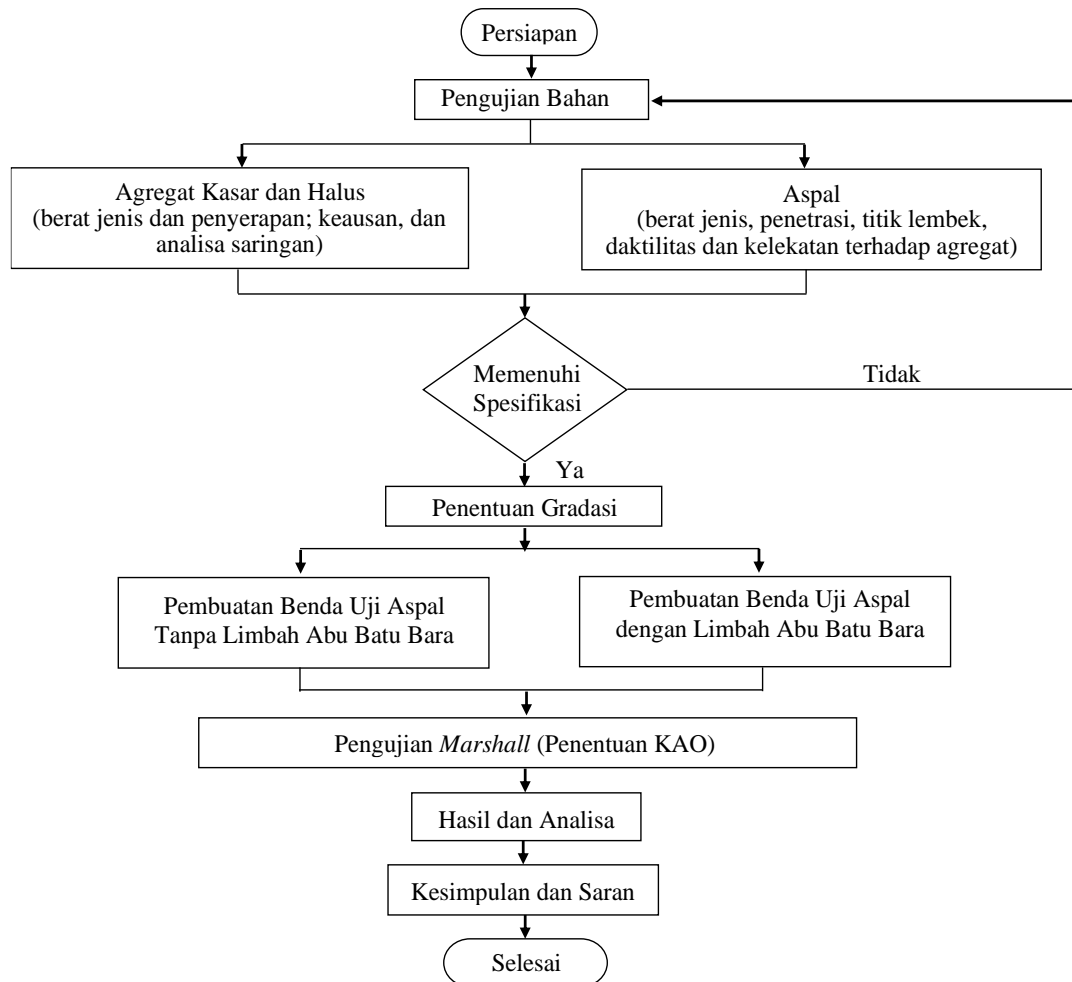
Terima kasih penulis ucapkan kepada seluruh teknisi dan PLP Laboratorium Struktur, Uji Bahan dan Batuan, Politeknik Negeri Banjarmasin, terutama kepada saudari Adelia Pebriyanti, A.Md.T yang berkontribusi besar dalam pengambilan data utama penunjang artikel ini.

REFERENSI

- Anshar, N., Saleh, M. S., & Fisaini, J. (2023). Karakteristik Campuran Aspal Beton Menggunakan Coal Bottom Ash dengan Persentase 0%, 5%, dan 10% Sebagai Substitusi Agregat Halus. *Journal of The Civil Engineering Student*, 5(1), 85-91. doi:10.24815/journalces.v5i1.21884
- Bianglala, K. (2020). Pengaruh Kadar Bottom Ash sebagai Substitusi Agregat Halus Terhadap Karakteristik Campuran AC-WC. *Pengaruh Kadar Bottom Ash sebagai Substitusi Agregat Halus Terhadap Karakteristik Campuran AC-WC*. Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Retrieved September 18, 2023, from <http://eprints.unram.ac.id/15596/1/TUGAS%20AKHIR%20LENGKAP.pdf>
- Badan Standardisasi Nasional. 2003. *RSNI M-01-2003: Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat Marshall*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta
- Badan Standardisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 2417: 2008 tentang Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 1970: 2008 tentang Cara Uji*

- Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus.* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 1969: 2008 tentang Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar.* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 2432:2011 tentang Cara Uji Daktilitas Aspal.* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 2343:2011 tentang Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball).* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 2441:2011 tentang Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras.* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. *Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 2456:2011 tentang Cara Uji Penetrasi Aspal.* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2008. *SNI 2417:2008 tentang Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles.* Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2. *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan-Revisi 2.* Jakarta, Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Retrieved September 18, 2023, from <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/spesifikasi-umum-bina-marga-2018-untuk-pekerjaan-konstruksi-jalan-dan-jembatan-revisi-2-no-161sedb2020>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2022). Timbunan Pilihan dan Lapis Fondasi Menggunakan Abu Batu bara/ Fly Ash dan Bottom Ash (FABA). Jakarta, Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Retrieved September Monday, 2023, from <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/sk-h-1515-timbunan-pilihan-dan-lapis-fondasi-menggunakan-abu-batu-barafly-ash-dan-bottom-ash-faba>
- Gazalie, R., Fauzi, M., Hawinuti, R., & Helmi, M. (2023). Pemanfaatan Limbah Abu Batu Sebagai Filler pada lastor Lapis Aus (HRS-WC). *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 7(1), 71-85. doi:<https://doi.org/10.31961/gradasi.v7i1>
- Gusman, R., & Ansyori, A. (2014). Penggunaan Abu Dasar Batu Bara sebagai Pengganti Sebagian Agregat Halus pada Campuran Latasir B terhadap Karakteristik Marshall. *Media Teknik Sipil*, 12(2), 163-172. doi:10.22219/jmts.v12i2.2288
- Lusyana, Mukhlis, Alli, S., & Kharlindo, M. Y. (2021). Kinerja Durabilitas Campuran Aspal Hot Rolled Sheet-Wearing Course (HRS-WC) dengan Substitusi Cangkang Sawit sebagai Agregat Halus. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 81-91. doi:<http://dx.doi.org/10.36055/fondasi.v10i1.11061>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.* Jakarta, Jakarta, Indonesia: Pemerintah Republik Indonesia. Retrieved September 18, 2023, from <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- Sujatmiko, D., Robby, & Elvina, i. (2022). Analisa Penggunaan Limbah Gypsum sebagai Agregat Halus pada Campuran Perkerasan Hot Rolled Sheet Base (HRS-Base). *Spektrum Sipil*, 9(1), 67-78. doi:<https://doi.org/10.29303/spektrum.v9i1.238>
- Zulfikar, I. (2021). Penggunaan Abu Batu Bara sebagai Pengganti Agregat Halus pada Campuran Aspal Beton AC-WC. *Jurnal Artesis*, 1(1), 31-36. doi:<https://doi.org/10.35814/artesis.v1i1.2705>

LAMPIRAN



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

TABEL 14. Perhitungan Marshall tanpa Limbah Batu Bara

No. Sampel	Variasi Limbah	Kadar Aspal	BJ Bulk Agregat	BJ Semu Agregat	BJ Efektif Agregat	BJ Maksimum Campuran	Berat (gram)			Isi Benjolan Uji	Bj Campuran (VIM)	Bulk Rongga Udara (%)	Stabilitas		Kelelehan Plastis (mm)	Hasil Bagi Marshall (Kg/m ³)	VM (%)	VF (%)	Luas Permukaan (m ² /kg)	Penyerapan Aspal (%)	Tebal Lapisan Aspal Film
							Di Udara	Dalam Air	SSD				L	M							
1	15 13 62 10	6,0	2,531	2,631	2,581	2,362	1227,3	679,9	1229,2	549,3	2,234	5,000	110,0	1325,5	5,30	250,1	17,0	70,6	2,085	0,776	26,334
2	15 13 62 10	6,0	2,531	2,631	2,581	2,362	1256,2	695,1	1257,2	562,1	2,235	5,000	113,0	1361,7	3,40	400,5	17,0	70,5	2,085	0,776	26,334
3	15 13 62 10	6,0	2,531	2,631	2,581	2,362	1256,2	696,4	1258,4	562,4	2,234	5,000	121,0	1458,1	5,80	251,4	17,0	70,6	2,085	0,776	26,334
4	15 13 62 10	6,0	2,531	2,631	2,581	2,362	1252,1	694,3	1254,3	560,3	2,235	5,000	94,00	1132,7	3,98	284,6	17,0	70,6	2,085	0,776	26,334

(Hasil Perhitungan, 2023)

History of article:

Received: 30 September 2023, Revised: 28 Juni 2024, Published: 30 Juni 2024

TABE: 15. Perhitungan Marshall dengan Limbah Batu Bara

No. Sampel	Variasi Limbah	Kadar Aspal	BJ Bulk Agregat	BJ Semu Agregat	BJ Efektif Agregat	BJ Maksimum Campuran	Berat (gram)			Isi Benjolan Uji	Bj Bulk Campuran	Rongga Udara (VIM) (%)	Stabilitas	Kelelehan Plastis (mm)	Hasil Bagi Marsh (Kg/m ³)	VM (%)	VF (%)	Luas Permukaan (m ² /kg)	Penyerapan Aspal (%)	Tebal Lapis Aspal Film	
							Di Udara	Dalam Air	SSD												F
1	15 13 62 10	6,0	2,501	2,625	2,563	2,348	1248,6	674	1261,2	586,8	2,128	9,364	105,00	1265,4	4,70	269,2	20,04	53,28	2,085	0,978	25,315
2	15 13 62 10	6,0	2,501	2,625	2,563	2,348	1233,8	671	1252,8	581,5	2,121	9,651	134,00	1614,7	6,45	250,3	20,30	52,45	2,085	0,978	25,315
3	15 13 62 10	6,0	2,501	2,625	2,563	2,348	1249,8	682	1266,8	585,1	2,135	9,042	109,00	1313,5	5,80	226,5	19,76	54,24	2,085	0,978	25,315
4	15 13 62 10	6,0	2,501	2,625	2,563	2,348	1248,7	689	1264,7	576	2,169	7,621	137,00	1650,9	5,36	308,0	18,50	58,815	2,085	0,978	25,315

(Hasil Perhitungan, 2023)