

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH *BOTTOM ASH* DAN *FLY ASH* SEBAGAI MATERIAL SUBSTITUSI PADA CAMPURAN *ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC)*

**Disusun Dalam Rangka Memenuhi Persyaratan Penyelesaian
Program Sarjana Strata Satu (S-1) Program Studi Teknik Sipil
Universitas Islam Sultan Agung**



**Disusun Oleh :
Hazlinda Salwa Yunita
NIM : 30201900102**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

2023

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH *BOTTOM ASH* DAN *FLY ASH* SEBAGAI
MATERIALSUBSTITUSI PADA CAMPURAN *ASPHALT CONCRETE-
WEARING COURSE (AC-WC)*



Hazlinda Salwa Yunita

NIM : 30201900102

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, Juli 2023

Tim Penguji

Tanda Tangan

1. **Dr. Abdul Rochim, ST., MT.**

NIDN : 0610118101

2. **Juny Andry Sulistyo, ST, MT**

NIDN : 0611118903

3. **Lisa Fitriyana, ST., M.Eng**

NIDN : 0605016802

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Universitas Islam Sultan Agung

Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

NIDN: 0625059102

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No: 04 / A.2 / SA – T / III / 2023

Pada hari ini tanggal 24 Juli 2023 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping:

1. Nama : Dr. Abdul Rochim, ST., MT.
Jabatan Akademik : Lektor III C
Jabatan : Dosen Pembimbing Utama
2. Nama : Juny Andry Sulistyo, ST, MT
Jabatan Akademik : Asisten Ahli
Jabatan : Dosen Pembimbing Pendamping

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir:

Hazlinda Salwa Yunita
NIM : 30201900102

Judul : ANALISIS PENGARUH *BOTTOM ASH* DAN *FLY ASH* SEBAGAI MATERIAL SUBSTITUSI PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC)

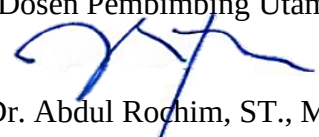
Dengan tahapan sebagai berikut :

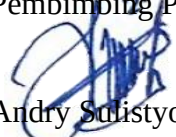
No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	04/10/2022	ACC
2	Seminar Proposal	26/12/2022	
3	Pengumpulan data	04/01/2023	
4	Analisis data	11/04/2023	
5	Penyusunan laporan	17/05/2023	ACC
6	Selesai laporan	14/07/2023	

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

Dosen Pembimbing Utama

Dosen Pembimbing Pendamping


Dr. Abdul Rochim, ST., MT.


Juny Andry Sulistyo, ST, MT

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Sipil


Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

NAMA : Hazlinda Salwa Yunita

NIM 30201900102

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :

ANALISIS PENGARUH *BOTTOM ASH* DAN *FLY ASH* SEBAGAI MATERIAL SUBSTITUSI PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC)

benar bebas plagiat dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Semarang, Juli 2023
Yang membuat pernyataan

Hazlinda Salwa Yunita
NIM : 30201900102



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

NAMA : Hazlinda Salwa Yunita
NIM : 30201900102
JUDUL TUGAS AKHIR : Analisis Pengaruh *Bottom Ash* dan *Fly Ash* Sebagai Material Substitusi Pada Campuran *Asphalt Concrete- Wearing Course* (AC-WC)

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan – bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang, Juli 2023
Yang membuat pernyataan,

The image shows a large, faint watermark of the UNISSULA logo in the background. The logo is a shield-shaped emblem with a crescent moon and star at the top, an open book in the center, and the university's name in Indonesian and Arabic script. In the bottom right corner, there is a handwritten signature in black ink over a rectangular official stamp. The stamp contains the text 'METERAI TEMPEL' and a unique identification number 'A37AKX503967269'.

Hazlinda Salwa Yunita
NIM : 30201900102

MOTTO

“Kamu adalah umat yang terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang ma'ruf, dan mencegah dari yang munkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli Kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka, di antara mereka ada yang beriman, dan kebanyakan mereka adalah orang-orang yang fasik”.

(Surat ali imran ayat 110)

“Allah mencintai pekerjaan yang apabila bekerja ia menyelesaikannya dengan baik”.

(HR. Thabrani)

“Barang siapa merasa letih di malam hari karena berkerja, maka di malam itu ia diampuni”.

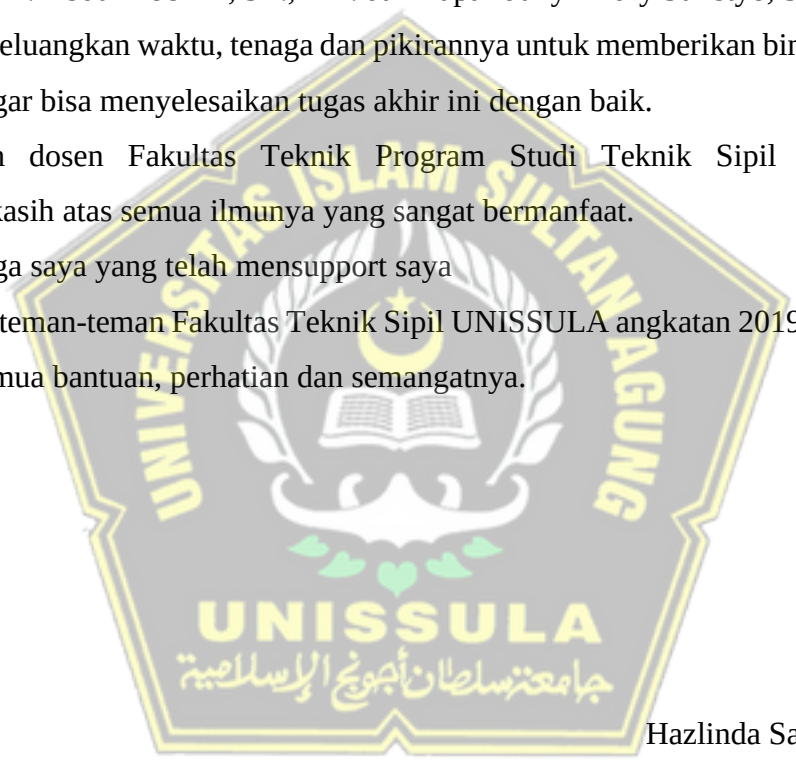
(H.R. Ahmad)



PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadiran Allah SWT, Tuhan pemilik jiwa dan alam semesta yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya. Sholawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarganya, sahabatnya dan juga para pengikutnya. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya, Bapak saya Rustam Adji dan Ibu saya Warmuti, atas semua dukungan moral maupun material, kasih sayang, kesabaran dan do'a.
2. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT. dan Bapak Juny Andry Sulisty, ST., MT. yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk memberikan bimbingan pada kami agar bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
3. Seluruh dosen Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil UNISSULA, terimakasih atas semua ilmunya yang sangat bermanfaat.
4. Keluarga saya yang telah mensupport saya
5. Semua teman-teman Fakultas Teknik Sipil UNISSULA angkatan 2019, terimakasih atas semua bantuan, perhatian dan semangatnya.



Hazlinda Salwa Yunita

NIM : 30201900102

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, karena hanya dengan rahmat dan karunia-Nya laporan Tugas Akhir ini dapat terselasaikan dengan baik tentang “Analisa Pengaruh Bottom Ash dan Fly Ash Sebagai Material Substitusi Pada Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)”, guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana Teknik Sipil di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Pada kesempatan ini, penulis hendak menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Bapak M. Rusli Ahyar, ST., M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan pada kami agar bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
3. Bapak Juny Andry Sulisty, ST, MT. selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan pada kami agar bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada penulis
5. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya, semoga tugas akhir ini bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para pembacanya.

Semarang, Juli 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
PERNYATAAN KEASLIAN	v
MOTTO	vi
PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
ABSTRAK	xvii
ABSTRACT	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Studi.....	2
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Sistematika Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Campuran Asphalt Concrete Wearing Course	4
2.2 Aspal	8
2.3 Agregat.....	11
2.3.1. Agregat Kasar	11
2.3.2. Agregat Halus.....	12
2.3.3. Bahan Pengisi (Filler).....	13
2.3.4. Gradasi Agregat	13
2.3.5. Gradasi Agregat Gabungan.....	15
2.4 Bottom Ash	16
2.4.1. Pengertian Bottom Ash.....	16
2.4.2 Sifat Fisik Bottom Ash	16
2.4.3 Sifat Kimia Bottom Ash	17

2.4.4 Sifat Mekanis Bottom Ash.....	17
2.4.5 Sifat Fisik pada Wet dan Dry Bottom Ash	18
2.5 Fly Ash.....	19
2.5.1 Pengertian Fly ash.....	19
2.5.2 Sifat Fisik dan Karakteristik Fly Ash.....	19
2.5.3 Sifat Kimia Fly Ash	20
2.6 Penentuan Kadar Aspal Optimum (Cara Marshall).....	20
2.7 Metode Pengujian.....	21
2.7.1 Metode Pengujian Aspal.....	21
2.7.2 Metode Pengujian Agregat	21
2.8 Sifat-sifat Campuran Lapisan Aspal Beton	23
2.8.1. Stabilitas	24
2.8.2. Kelelehan Plastis (Flow).....	24
2.8.3 Marshall Quotient (MQ).....	24
2.8.4 Void In the Mix (VIM)	25
2.8.5 Void in the Mineral Agregat (VMA).....	25
2.9 Pengujian Ekstraksi.....	26
2.10 Job Mix Design	27
2.11 Penelitian Terdahulu yang Sejenis	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	32
3.1 Metode Penelitian.....	32
3.2. Rancangan dan Pelaksanaan Penelitian	33
3.3 Studi Literatur.....	34
3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian	34
3.4.1 Bahan Penelitian	34
3.4.2 Perlengkapan Penelitian.....	34
3.5 Pengujian Bahan Penelitian	35
3.5.1 Pengujian Material Aspal.....	35
3.5.2. Pengujian Material Agregat.....	36
3.5.3. Bahan Pengisi (filler).....	36
3.6. Pemilihan Gradasi Agregat.....	37

3.7. Penentuan Kadar Aspal Optimum	37
3.8. Pembuatan Benda Uji	38
3.9. Pengujian Marshall.....	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1. Hasil Pengujian Bahan	39
4.1.1. Hasil Pengujian Aspal Pertamina Penetrasi 60/70	39
4.1.2. Pemeriksaan Gradasi Agregat.....	40
4.2. Rancangan Campuran Aspal (Job Mix Design)	44
4.3. Pembuatan Benda Uji	46
4.4. Penentuan Kadar Aspal Optimum.....	47
4.5. Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum GMM	51
4.6. Ekstraksi	52
4.7. Sifat Metode Marshall dari Campuran Aspal Panas.....	52
4.8. Gradasi Material Agregat	53
4.9. Hasil Pengujian Marshall	53
4.9.1. Hasil Marshall Benda Uji Komposisi Normal	54
4.9.2. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 30%	56
4.9.3. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 50%	58
4.9.4. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 0%	60
4.9.5. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Bottom Ash 30% + Fly Ash 0%	62
4.9.6. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 0%	64
4.9.7. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Bottom Ash 50% + Fly Ash 0%	66
4.10. Hasil Rekapitulasi	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	77
5.1. Kesimpulan.....	77
5.2. Saran.....	77

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kebutuhan campuran untuk perkerasan	8
Tabel 2.3. Ketentuan Agregat Kasar	12
Tabel 2.4. Ketentuan Agregat Halus	13
Tabel 2.5. Ketentuan <i>Filler</i>	13
Tabel 2.6. Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Aspal	15
Tabel 2.7. Sifat fisik <i>bottom ash</i>	17
Tabel 2.9. Sifat Fisik pada <i>Wet dan Dry Bottom Ash</i>	18
Tabel 2.10. Syarat-syarat penentuan kadar aspal	20
Tabel 2.11. Syarat Berat Jenis dan Penyerapan Agregat	23
Tabel 2.12. Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)	23
Tabel 3.1. Ketentuan Penggunaan Aspal Penetrasi 60/70	35
Tabel 3.2. Ketentuan Gradasi Agregat Laston AC-WC	37
Tabel 4.1. Data Pengujian Aspal Pertamina Penetrasi 60/70	39
Tabel 4.2. Hasil Pemeriksaan analisis saringan agregat kasar $\frac{3}{4}$ inch.	40
Tabel 4.3. Hasil Pemeriksaan analisis saringan agregat kasar $\frac{1}{2}$ "	41
Tabel 4.4. Hasil Pemeriksaan analisis saringan Abu Batu	41
Tabel 4.5. Hasil Pemeriksaan analisis saringan pasir	42
Tabel 4.6. Hasil Pemeriksaan analisis saringan filler	42
Tabel 4.7. Gradasi Campuran AC-WC	43
Tabel 4.8. Rancangan Campuran Aspal FA 0% dan BA 0%	44

Tabel 4.9. Rancangan Campuran Aspal <i>FA</i> 50% dan <i>BA</i> 50%.....	44
Tabel 4.10. Rancangan Campuran Aspal <i>BA</i> 30% dan <i>FA</i> 0%.....	45
Tabel 4.11. Rancangan Campuran Aspal <i>FA</i> 50% dan <i>BA</i> 0%.....	45
Tabel 4.12. Rancangan Campuran Aspal <i>FA</i> 0% dan <i>BA</i> 50%.....	45
Tabel 4.13. Rancangan Campuran Aspal <i>FA</i> 30% dan <i>BA</i> 0%.....	46
Tabel 4.14. Rancangan Campuran Aspal) <i>FA</i> 30% dan <i>BA</i> 30%	46
Tabel 4.15. Rincian Benda Uji.....	47
Tabel 4.16. Karakteristik campuran AC-WC pada variasi kadar aspal	48
Tabel 4.17. VIM kepadatan membal (PRD)	48
Tabel 4.18 Karakteristik campuran AC-WC pada kadar aspal optimum	51
Tabel 4.19. Pemeriksaan berat jenis campuran maksimum GMM.....	51
Tabel 4.20. Hasil Gradasi Ekstraksi.....	52
Tabel 4.21. Sifat Metode Marshall dari Campuran Aspal Panas.....	52
Tabel 4.22. Gradasi Material Agregat.....	53
Tabel 4.23. Hasil <i>Marshall</i> Komposisi Normal.....	54
Tabel 4.24. Hasil Marshall Kombinasi <i>Fly Ash</i> 30% + Bottom Ash 30%.....	56
Tabel 4.25. Hasil Marshall Kombinasi <i>Fly Ash</i> 50% + Bottom Ash 50%.....	58
Tabel 4.26. Hasil Marshall Kombinasi <i>Fly Ash</i> 30% + Bottom Ash 0%.....	60
Tabel 4.27. Hasil Marshall Kombinasi Bottom Ash 30% + <i>Fly Ash</i> 0%.....	62
Tabel 4.28. Hasil Marshall Kombinasi <i>Fly Ash</i> 50% + Bottom Ash 0%.....	64
Tabel 4.29. Hasil Marshall Kombinasi Bottom Ash 50% + <i>Fly Ash</i> 0%.....	66

Tabel 4.30. Hasil Rekapitulasi diambil rata-rata.....	68
Tabel 4.31. Nilai Rekapitulasi VMA	69
Tabel 4.32. Nilai Rekapitulasi VIM.....	70
Tabel 4.33. Nilai Rekapitulasi VFB.....	71
Tabel 4.34. Nilai Rekapitulasi Stabilitas.....	72
Tabel 4.35. Nilai Rekapitulasi Flow	73
Tabel 4.36. Nilai Rekapitulasi <i>Marshall Quotient</i>	74



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Gradasi Agregat Berdasarkan Jenisnya	15
Gambar 2.2. <i>Bottom Ash</i>	16
Gambar 2.3. <i>Fly Ash</i>	19
Gambar 2.4. Alat Refluks.....	27
Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian	33
Gambar 4.1. Gradasi Campuran.....	43
Gambar 4.2. Hasil Penentuan Kadar Aspal Optimum	49
Gambar 4.3. Hasil Penentuan Kadar Aspal Optimum	50
Gambar 4.4. Grafik Hasil <i>Marshall</i> Komposisi Normal.....	55
Gambar 4.5. Grafik Hasil <i>Marshall</i> Kombinasi FA 30% + BA 30%	57
Gambar 4.6. Grafik Hasil <i>Marshall</i> Kombinasi FA 50% + BA 50%	59
Gambar 4.7. Grafik Hasil <i>Marshall</i> Kombinasi FA 30% + BA 0%	61
Gambar 4.7. Grafik Hasil <i>Marshall</i> Kombinasi BA 30% + FA 0%	63
Gambar 4.8. Grafik Hasil <i>Marshall</i> Kombinasi FA 50%+BA 0%	65
Gambar 4.10. Grafik Nilai VMA	69
Gambar 4.11. Grafik Nilai VIM.....	70
Gambar 4.12. Grafik Nilai VFB.....	71
Gambar 4.13. Grafik Stabilitas.....	72
Gambar 4.14. Grafik Nilai Flow	73

ANALISIS PENGARUH *BOTTOM ASH* DAN *FLY ASH* SEBAGAI MATERIAL SUBSTITUSI PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC)

Abstrak

Jalan raya penting dalam masyarakat kontemporer, mendorong mobilitas dan pertumbuhan ekonomi. Industri konstruksi jalan raya mencari cara mengurangi dampak lingkungan dengan memanfaatkan limbah industri sebagai material pengganti pada campuran aspal dan beton (AC). Residu industri seperti *bottom ash* dan *fly ash*, dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik, harus diproses dengan benar untuk mencegah kerusakan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh stabilitas dan *flow* penggunaan AC-WC yang dicampur dengan substitusi *bottom ash* dan *fly ash*, serta mendapatkan Rancangan Campuran (JMD) yang sesuai dengan penggunaan bahan substitusi tersebut.

Penelitian ini merupakan percobaan laboratorium di mana *bottom ash* dan *fly ash* ditambahkan ke dalam beton aspal sebagai bahan tambahan. Penelitian ini menggunakan metode uji Marshall sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2018 untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) campuran sebesar 5,8%, dengan variasi penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* sebesar 0%, 30%, dan 50%.

Hasil pengamatan terhadap data pengujian menunjukkan bahwa nilai stabilitas tertinggi tercapai dari substitusi *bottom ash* dan *fly ash* pada benda uji setelah penambahan *bottom ash* sebesar 30% dan *fly ash* sebesar 30%, yaitu sebesar 2742,22 kg. Benda uji dengan nilai *flow* tertinggi ditemukan pada komposisi abu batu dan *bottom ash* sebesar 50%, dengan nilai *flow* sebesar 2,30 mm. Selain itu, didapatkan Rancangan Campuran (JMD) terbaik ada pada kombinasi *fly ash* 30% + *bottom ash* 30%.

Kata kunci: *Bottom ash*, Campuran AC-WC, *Fly ash*, Karakteristik Marshall.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF BOTTOM ASH AND FLY ASH AS SUBSTITUTION MATERIALS IN ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE (AC-WC) MIXTURES

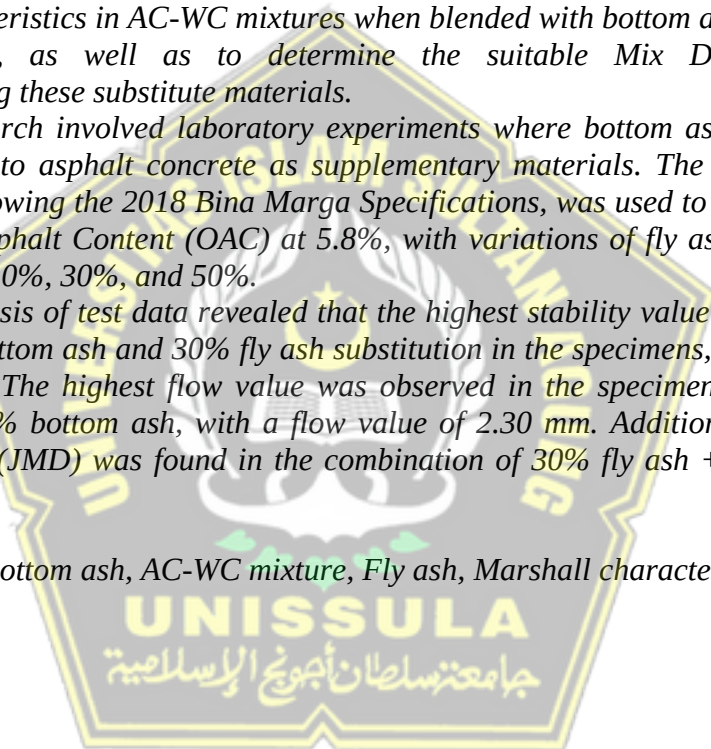
Abstract

Roads play a crucial role in contemporary society by facilitating mobility and economic growth. The road construction industry seeks to mitigate environmental impact by utilizing industrial waste as substitutes in asphalt and concrete (AC) mixtures. Industrial residues such as bottom ash and fly ash, generated from coal combustion in power plants, need proper processing to prevent environmental damage. The purpose of this research is to look into the effects of stability and flow characteristics in AC-WC mixtures when blended with bottom ash and fly ash substitutions, as well as to determine the suitable Mix Design (JMD) incorporating these substitute materials.

The research involved laboratory experiments where bottom ash and fly ash were added to asphalt concrete as supplementary materials. The Marshall test method, following the 2018 Bina Marga Specifications, was used to determine the Optimum Asphalt Content (OAC) at 5.8%, with variations of fly ash and bottom ash usage at 0%, 30%, and 50%.

The analysis of test data revealed that the highest stability value was achieved with 30% bottom ash and 30% fly ash substitution in the specimens, amounting to 2742.22 kg. The highest flow value was observed in the specimens using stone dust and 50% bottom ash, with a flow value of 2.30 mm. Additionally, the best Mix Design (JMD) was found in the combination of 30% fly ash + 30% bottom ash.

Keywords: Bottom ash, AC-WC mixture, Fly ash, Marshall characteristics.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai salah satu infrastruktur penting dalam masyarakat kontemporer, jalan raya memainkan peran yang sangat penting dalam mendorong mobilitas dan perkembangan ekonomi. Industri konstruksi jalan raya terus mencari cara untuk mengurangi dampak lingkungan dan mengembangkan material yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pemanfaatan limbah industri menjadi material pengganti pada campuran aspal dan beton (AC) termasuk tahapan yang diperlukan untuk mencapai tujuan ini. Residu industri seperti *bottom ash* dan *fly ash*, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik, menimbulkan masalah limbah yang signifikan dan harus diproses dengan benar untuk mencegah kerusakan lingkungan.

Bottom ash dan *fly ash* adalah dua jenis produk sampingan dari pembakaran batubara yang sering dipandang sebagai material yang dapat didaur ulang dan berpotensi untuk digunakan dalam konstruksi jalan. PT Tanjung Jati B di Jepara adalah sumber material yang digunakan di sini. Penggunaan limbah ini dapat dimanfaatkan sebagai pengganti material dalam campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) memberikan peluang untuk mengurangi dampak lingkungan dan memanfaatkan limbah industri secara lebih berkelanjutan.

Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) bertanggung jawab untuk menyediakan permukaan jalan yang halus, tahan aus, dan tahan lalu lintas sebagai campuran lapisan permukaan. Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat peningkatan minat untuk menggunakan limbah daur ulang untuk menggantikan bagian dari komponen campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course*. *Bottom ash* dan *fly ash* merupakan dua bentuk limbah batubara yang berpotensi untuk didaur ulang.

Saat ini, campuran AC-WC konvensional terutama terdiri dari agregat batu alam dan aspal. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan *bottom ash* dan *fly ash* sebagai pengganti sebagian atau seluruh bahan konvensional dalam campuran AC-WC dapat menghasilkan kinerja teknis dan

dampak lingkungan yang positif. Telah banyak peneliti yang mencoba mensubstitusi material perkerasan dengan cara mensubstitusi material pengisi (*filler*) (Zulfhazli, 2016).

Berdasarkan konteks di atas, peneliti ingin mengetahui dampak penggunaan *bottom ash* dan *fly ash* sebagai material alternatif campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC). Penelitian ini berjudul "Analisis Dampak Penggunaan *Bottom Ash* dan *Fly Ash* sebagai Bahan Substitusi pada Campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC)".

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan konteks di atas, penulis mengidentifikasi beberapa masalah, beberapa di antaranya :

1. Bagaimana Campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan Substitusi *Bottom Ash* dan *Fly Ash* dapat berpengaruh terhadap stabilitas *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC)?
2. Bagaimana Campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan Substitusi *Bottom Ash* dan *Fly Ash* dapat berpengaruh terhadap kelelahan plastis (*flow*)?

1.3 Tujuan Studi

Dari cara perumusan masalah tersebut, dapat ditarik tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh dari campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan Substitusi *Bottom Ash* dan *Fly Ash* terhadap stabilitas aspal *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC)
2. Mengetahui pengaruh dari campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan Substitusi *Bottom Ash* dan *Fly Ash* terhadap kelelahan plastis (*flow*)
3. Mendapatkan JMD (*Job Mix Design*) yang sesuai.

1.4 Batasan Penelitian

Beberapa batasan yang relevan dengan penelitian ini meliputi::

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Transportasi Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang dan tidak dilakukan pencampuran di lapangan.
2. Fokus penelitian ini adalah penggunaan *Bottom ash* dan *Fly ash* sebagai material substitusi yang dilakukan melalui uji *properties* agregat material.

1.5 Sistematika Penelitian

Metode yang digunakan untuk menulis laporan tugas akhir ini dibagi menjadi beberapa bab, yaitu sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab pertama memberikan konteks untuk masalah yang dibahas dan mendefinisikan ruang lingkup, tujuan, dan dasar-dasar metodologisnya.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memberikan penjelasan teoritis tentang topik tersebut, serta definisi dan pemanfaatan *bottom ash* dan *fly ash* sebagai substitusi.

BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang contoh dan metode penelitian, serta aliran penelitian, bahan dan peralatan yang digunakan, desain campuran, pengujian material, persiapan contoh, pengujian contoh, dan analisis data yang dilakukan selama aktivitas pengujian lab yang dilakukan sesuai dengan persyaratan SNI.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas data yang dikumpulkan serta temuan-temuan identifikasi.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini mencakup kesimpulan dan saran tentang temuan pembahasan yang telah dibahas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Campuran Asphalt Concrete Wearing Course

Sebagai lapisan teratas dari jalan raya, *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC), yang juga dikenal sebagai lapisan permukaan aspal, menanggung volume lalu lintas dan jumlah kendaraan setiap hari. Istilah "lapisan permukaan beton aspal" juga dapat digunakan untuk menyebut lapisan ini. Fungsi utamanya adalah untuk menciptakan permukaan yang rata, tahan aus, dan tahan terhadap beban lalu lintas untuk dilalui kendaraan, sehingga meningkatkan keamanan dan kenyamanan jalan raya bagi semua orang yang menggunakannya.

AC-WC memberikan permukaan jalan yang nyaman dan halus. Kehalusan permukaan mengurangi gesekan ban, sehingga menghasilkan pengendaraan yang lebih mulus. Selain itu, ketahanan aspal terhadap keausan memperpanjang usia jalan dan mengurangi kebutuhan akan perawatan dan perbaikan tambahan.

Campuran AC-WC terdiri dari agregat kasar dan halus, aspal, dan bahan pengisi seperti batu kapur dan serbuk. Dalam hal stabilitas mekanis, agregat kasar berfungsi sebagai pengikat utama, sedangkan agregat halus berfungsi sebagai pengikat antar partikel untuk mencapai ketahanan abrasi yang baik. Aspal memiliki peran penting sebagai pengikat dalam membentuk matriks antar agregat, memberikan kekuatan dan perlindungan dari kelembaban. Bahan pengisi digunakan untuk mengisi celah antara agregat kasar dan agregat halus.

Volume lalu lintas, cuaca, kemiringan jalan, dan spesifikasi regional semuanya berperan dalam menentukan seberapa tebal lapisan aspal beton (*Asphalt Concrete Wearing Course*/AC-WC) yang dibutuhkan. AC-WC dapat bervariasi dalam ketebalan dari 2 hingga 5 sentimeter (0,75 hingga 2 inci).

AC-WC membutuhkan perawatan rutin untuk memastikan kinerja yang optimal. Perawatan rutin meliputi pembersihan, perbaikan area yang rusak atau retak, dan, jika perlu, penimbunan dan pelapisan ulang untuk menjaga kualitas dan keamanan permukaan jalan.

Dengan fungsi utamanya sebagai lapisan permukaan jalan, *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC) berperan penting dalam menyediakan infrastruktur

jalan yang tahan lama, aman, dan nyaman bagi para pengguna jalan. Kualitas dan kinerja AC-WC yang optimal akan terjamin melalui pemilihan material, desain, dan pemeliharaan yang cermat.

Kualitas fisik, mekanik, dan kimiawi dari campuran aspal beton (AC) yang mempengaruhi kinerja dan kualitas jalan atau infrastruktur lainnya disebut sebagai karakteristik campuran aspal. Sifat-sifat ini mencakup berbagai macam kriteria yang sangat penting untuk dipertimbangkan saat mendesain, membangun, dan memelihara lapisan beton aspal. Campuran aspal memiliki karakteristik penting sebagai berikut :

1. Stabilitas

Stabilitas mengacu pada ketahanan aspal terhadap deformasi sampai mencapai titik leleh. Campuran aspal dapat dianggap memiliki stabilitas yang tinggi ketika mengandung agregat dengan gradasi yang baik, rapat, dan memiliki ruang kosong antara butiran agregat.

Lalu lintas dan berat mobil yang melintas di jalan mempengaruhi stabilitas pada campuran aspal. Stabilitas ini dicapai melalui gesekan butiran agregat, saling mengunci antar partikel, dan daya rekat yang baik. Stabilitas benda uji campuran beton aspal panas ditunjukkan dalam *pound* (lb) selama pengujian dengan alat Marshall.

Nilai stabilitas Marshall meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal. hingga mencapai tingkat tertentu. Ketika nilai tersebut tercapai, stabilitas mengalami penurunan.

Nilai stabilitas harus mencapai kriteria minimum 800 kg, mengikuti spesifikasi yang diuraikan dalam Spesifikasi Bina Marga 2018, dapat dihitung dengan menggunakan perhitungan berikut.

$$q = p \times s \times 0,4536 \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

q = Nilai stabilitas (kg)

o = Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat

p = penyesuaian ketebalan benda uji

0,4536 = Mengubah satuan dari *pound* (lb) ke *kilogram* (kg)

2. Keawetan (*durability*)

Keawetan (*durability*) adalah Ketahanan aspal terhadap keausan yang disebabkan oleh cuaca dan iklim, fluktuasi suhu, dan kerusakan yang disebabkan oleh beban ban kendaraan adalah hal yang membuatnya tahan lama.. Beban lalu lintas dan dampak iklim menyebabkan penuaan aspal, yang menyebabkan ketahanan lapisan perkerasan terhadap keausan. Kadar aspal yang tinggi, gradasi agregat yang padat, pemadatan yang sempurna, campuran agregat aspal yang mengandung air, dan batu lapis perkerasan yang cukup keras merupakan variabel yang dapat memperpanjang umur campuran agregat untuk aspal.

3. Kelenturan (*flexibility*)

Kelenturan (*flexibility*) lapisan perkerasan diukur dari ketahanannya terhadap keretakan akibat tekanan aktivitas kendaraan. Untuk mencapai tingkat fleksibilitas yang tinggi, penting untuk menggunakan VMA (*Void In Mineral Aggregate*) yang besar, VIM (*Void In Mix*) yang rendah, dan aspal penetrasi tinggi. Parameter fleksibilitas diukur dengan MQ (*Marshall Quotient*), yang merupakan hasil perbandingan antara stabilitas dan flow dalam uji Marshall.

4. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*)

Kemampuan lapisan aspal beton untuk menahan tekanan tanpa mengalami kerusakan atau menjadi rusak dikenal sebagai ketahanan lelah. Penggunaan aspal dengan komposisi yang tinggi, gradasi agregat yang baik, dan tidak adanya bleeding pada campuran merupakan cara untuk meningkatkan ketahanan lelah.

5. Kekesatan atau tahanan geser (*skid resistance*)

Kekesatan atau tahan geser (*skid resistance*) merupakan kinerja aspal beton dalam menyediakan gaya gesekan yang diperlukan untuk mencegah slip atau tergelincir pada roda kendaraan.

Maksud dari kekesatan permukaan atau ketahanan terhadap slip adalah untuk menjain keselamatan bagi pengguna jalan terutama saat kondisi jalan basah, Untuk meningkatkan kekesatan jalan, menggunakan material berbentuk kubus,

persentase agregat kasar yang tinggi, dan memastikan kandungan aspal yang tepat di atas permukaan agregat kasar.

Hal-hal yang mempengaruhi kekesatan jalan meliputi:

- Gradasi agregat
- Butiran agregat dengan permukaan kasar memiliki daya tahan yang tinggi karena kualitasnya.
- Kepadatan campuran
- Ukuran maksimum butir agregat
- Tebal film aspal
- Bentuk butiran atau area kontak antar butiran

6. Kedap Air (*impermeable*)

Kedap air (*impermeable*) adalah kemampuan aspal beton untuk mencegah air dan udara masuk ke dalam lapisan perkerasan sangat penting, karena paparan elemen-elemen ini mempercepat proses penuaan aspal dan dapat menyebabkan lapisan aspal terkelupas dari permukaan agregat.

7. Mudah dikerjakan (*workability*)

Mudah dikerjakan (*workability*) adalah kemampuan kerja campuran beton aspal mengacu pada seberapa mudah campuran tersebut dapat dipadatkan hingga mencapai kepadatan yang diinginkan.

Parameter yang tercantum di atas, jika digunakan untuk menentukan jenis dan jumlah aspal, gradasi/bentuk agregat, dan identifikasi rongga dalam campuran, akan menghasilkan kebutuhan yang mungkin berbenturan satu sama lain, Seperti yang tampak pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kebutuhan campuran untuk perkerasan

Faktor	Gradasi/btk agregat	Pen aspal	Jumlah aspal	Rongga
1. Kemudahan (Workability)	bulat	tinggi	banyak	-
2. Kekakuan (Stiffness)	padat	rendah	sedikit	-
3. Stabilitas	bersudut	rendah	sedikit	besar
4. Fleksibel	padat	-	banyak	-
5. Keawetan (durability)	padat	-	banyak	kecil
6. Tahan air	padat	-	banyak	kecil
7. Kekesatan	bersudut	-	sedikit	besar

2.2 Aspal

Aspal adalah zat perekat, kental, dan kental yang digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi, terutama dalam pembangunan jalan raya. Aspal berasal dari residu minyak bumi yang diisolasi selama penyulingan minyak mentah. Aspal merupakan salah satu komponen utama campuran beton aspal dan pengikat yang memberikan daya tahan dan kekuatan pada konstruksi jalan raya.

Aspal adalah bahan bangunan yang penting untuk jalan dan infrastruktur lainnya. Sifat perekatnya yang unik dan kemampuannya untuk membentuk lapisan yang kuat menjadikannya bahan yang ideal untuk menjamin daya tahan dan kenyamanan jalan, serta mendorong mobilitas dan pertumbuhan ekonomi.

Berdasarkan tempat asalnya, aspal dibedakan menjadi dua yaitu aspal alam dan aspal minyak.

1. Aspal Alam

Aspal alam adalah material aspal yang terbentuk secara alami tanpa pengolahan dan dapat digunakan. Aspal alam dapat ditemukan di gunung atau danau. Misalnya, aspal ditemukan di gunung Pulau Buton (Asbuton) dan di danau Trinidad (*Trinidad Lake Asphalt*).

2. Aspal Minyak

Minyak aspal diproduksi melalui penyulingan minyak bumi yang menghasilkan berbagai jenis aspal, yaitu aspal berasal dari minyak mentah dengan kandungan

aspal yang tinggi (*asphaltic base crude oil*), aspal berasal dari minyak mentah dengan kandungan parafin yang tinggi (*paraffin base crude oil*), serta aspal berasal dari minyak mentah dengan campuran kandungan parafin dan aspal (*mixed base crude oil*).

Berdasarkan bentuknya, aspal dibedakan menjadi tiga, seperti berikut :

1. Aspal keras

Aspal keras adalah jenis aspal yang berada dalam bentuk padat ketika disimpan pada suhu ruang 250°C-300°C dan akan cair jika dipanaskan. Aspal keras juga disebut semen aspal (*asphalt cement*). Sebelum diaplikasikan, aspal keras perlu dipanaskan terlebih dahulu sebagai bahan pengikat untuk agregat.

Adapun pengelompokkan aspal semen dilakukan baik pada nilai penetrasi kekerasan atau berdasarkan nilai itu sendiri.

Di Indonesia sendiri aspal semen dibedakan berdasarkan nilai penetrasi, meliputi AC 40/50 memiliki arti AC dengan penetrasi antara 40-50, AC 60/70 memiliki arti AC dengan penetrasi antara 60-70, AC 85/100 memiliki arti AC dengan penetrasi antara 85-100, AC 120/150 memiliki arti AC dengan penetrasi antara 120-150, AC 200/300 memiliki arti AC dengan penetrasi antara 200-300.

Aspal semen yang memiliki tingkat penetrasi dengan nilai rendah sesuai untuk digunakan pada daerah dengan cuaca yang panas, sementara aspal semen dengan tingkat penetrasi dengan nilai tinggi lebih cocok untuk digunakan di daerah dengan cuaca yang memiliki volume lalu lintas rendah.

Pada penelitian ini, digunakan aspal keras dengan angka penetrasi 60/70 yang dipasok oleh Pertamina, dan aspal ini harus memenuhi persyaratan spesifikasi yang tertera dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Ketentuan Aspal Penetrasi 60/70

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen 60/70
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 06-2456-1991	60-70
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	>48
Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432-2011	>100
Titik Nyala (°C)	SNI 2432-2011	>232
Berat Jenis	SNI 2441-2011	≥1,0
Viskositas Dinamis 60 °C (Pa.S)	SNI 06-6441-2000	160-240
Viskositas Kinematis 135 °C (cSt)	SNI 06-6441-2000	≥300
Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-03	≥90
Pengujian Residu Hasil TFOF (SNI 06-2440-1991) atau RTFOT (SNI 03-6835-2002)		
Berat yang hilang (%)	SNI 06-2441-1991	≤0.8
Viskositas Dinamamis 60 °C (Pa.S)	SNI 03-6441-2000	≤800
Penetrasi pada 25 °C (%)	SNI 06-2456-1991	≥54
Daktilitas pada 25°C (%)	SNI 2432:2011	≥100

2. Aspal Cair

Aspal cair adalah aspal yang berwujud cair dan diperoleh melalui proses penyulingan minyak bumi pada suhu ruang. Terkait dengan bahan pencair dan tingkat penguapan bahan pelarutnya, aspal cair dapat dibagi menjadi:

- *Rapid Curing Cut Back* (RC)

Mengandung semen aspal yang telah dicampur dengan bensin. RC memiliki tingkat penguapan yang paling cepat dibandingkan jenis aspal lainnya.

- *Medium Curing Cut Back* (MC)

Adalah semen aspal yang diencerkan dengan minyak bumi.

- *Slow Curing Cut Back* (SC)

Adalah jenis aspal yang diencerkan dengan solar. Aspal ini termasuk yang paling lambat dalam penguapan dibandingkan dengan jenis aspal lainnya.

3. Aspal Emulsi

Aspal emulsi adalah campuran aspal yang dikombinasikan dengan air dan pengemulsi. Sifatnya lebih cair daripada aspal cair. Aspal emulsi memiliki muatan listrik yang berfungsi untuk mencegah terbentuknya butiran-butiran yang lebih besar.

2.3 Agregat

Dalam beton campuran, beton aspal, dan bahan konstruksi lainnya, agregat adalah bahan butiran yang terbuat dari butiran mineral seperti pasir, kerikil, atau batu pecah. Karena menawarkan stabilitas mekanis dan kekuatan struktural dalam berbagai proyek konstruksi, agregat adalah salah satu material konstruksi yang paling penting.

2.3.1. Agregat Kasar

Agregat kasar adalah salah satu bentuk agregat yang digunakan dalam konstruksi, khususnya dalam produksi beton dan campuran beton aspal. Tergantung pada standar atau spesifikasi yang berlaku, agregat kasar terdiri dari butiran mineral yang lebih besar dengan ukuran partikel lebih besar dari 4,75 mm hingga sekitar 75 mm. Agregat kasar berfungsi sebagai pengisi utama dalam campuran konstruksi dan memberikan stabilitas mekanis pada struktur.

Agregat kasar berasal dari batuan alam yang dipecah atau ditambang, termasuk batu pecah, kerikil, batu kali, dan bahan alami lainnya. Banyak jenis batuan, termasuk granit, batu kapur, basal, dan serpih, dapat menghasilkan agregat kasar. Jenis granit yang digunakan akan mempengaruhi karakteristik agregat kasar, seperti kekuatan dan tekstur butirannya.

Ukuran butiran agregat kasar yang berbeda digunakan untuk membuat fraksi yang berbeda. Berikut ini adalah beberapa spesifikasi dasar untuk agregat kasar:

- Agregat Kasar Fraksi 10 mm hingga 20 mm
- Agregat Kasar Fraksi 20 mm hingga 40 mm
- Agregat Kasar Fraksi 40 mm hingga 75 mm

Ukuran agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton dan aspal beton akan disesuaikan dengan kebutuhan proyek bangunan. Selain itu, agregat ini harus sesuai dengan standar yang ditetapkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.1. Ketentuan Agregat Kasar

Pengujian			Metoda Pengujian	Nilai
Kekakuan bentuk agregat terhadap larutan		natrium sulfat	SNI 3407:2008	Maks.12 %
		magnesium sulfat		Maks.18 %
Abrasi dengan mesin Los Angeles ¹⁾	Campuran AC Modifikasi dan SMA	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6%
		500 putaran		Maks. 30%
	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal			SNI 2439:2011	Min. 95 %
Butir Pecah pada Agregat Kasar		SMA	SNI 7619:2012	100/90 ^{*)}
		Lainnya		95/90 ^{**)}
Partikel Pipih dan Lonjong		SMA	ASTM D4791-10 Perbandingan 1 : 5	Maks. 5%
		Lainnya		Maks. 10 %
Material lolos Ayakan No.200			SNI ASTM C117: 2012	Maks. 1%

2.3.2. Agregat Halus

Dalam industri bangunan, agregat halus paling sering ditemukan dalam beton aspal dan campuran beton. Tergantung pada norma atau spesifikasi yang berlaku, agregat halus didefinisikan sebagai butiran mineral dengan ukuran partikel kurang dari 4,75 mm. Kepadatan campuran bangunan ditingkatkan dengan penambahan agregat halus, yang juga berfungsi sebagai pengisi di antara butiran.

Agregat halus berasal dari batuan alam yang dipecah atau ditambang, seperti pasir sungai, pasir laut, atau pasir batu. Jenis batuan yang digunakan akan berpengaruh pada warna, bentuk, dan tekstur butiran agregat halus.

Ukuran butiran agregat halus bervariasi dan biasanya dipisahkan menjadi beberapa fraksi berdasarkan ukuran partikel. Berikut ini adalah standar umum untuk ukuran agregat halus:

- Fraksi Agregat Halus antara 2,36 dan 4,75 milimeter (pasir kasar).
- Fraksi Agregat Halus antara 0,15 dan 2,36 milimeter (pasir halus).
- Partikel Agregat Halus yang lebih kecil dari 0,15 milimeter (partikel pasir).

Spesifikasi umum untuk agregat halus sesuai dengan Divisi 6 dari Bina Marga 2018. (Jenderal & Marga, 2018).

Tabel 2.2 Ketentuan Agregat Halus

Pengujian	Metoda 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%

2.3.3. Bahan Pengisi (Filler)

Filler merupakan material pengisi yang digunakan dalam lapisan aspal harus berada dalam kondisi kering dan tidak berbentuk gumpalan. Ketika diuji melalui penyaringan yang memenuhi persyaratan SNI 03-4142-1996, bahan pengisi harus melewati saringan No. 200 (75 mikron) minimal sebanyak 75% dari jumlah yang melewati saringan No. 300 (600 mikron). Selain itu, bahan pengisi ini harus memiliki sifat non-plastis. (Bina Marga, 2018).

Fungsi *filler* yaitu untuk mengisi ruang kosong atau celah-celah dalam campuran dari agregat halus dan kasar untuk meningkatkan daya ikat aspal beton. Material pengisi yang dapat dimanfaatkan meliputi *bottom ash*, abu batu, semen, *fly ash*, atau mineral yang tidak bersifat plastis lainnya.

Jumlah material pengisi yang harus ditambahkan adalah setidaknya 1% dan maksimum 2% dari berat jumlah agregat. Tabel 2.5. berisi ketentuan tambahan untuk material pengisi atau *filler*.

Tabel 2.3 Ketentuan *Filler*

Pengujian	Standar	Nilai
Material lolos saringan No. 200	SNI 03-6723-2002	Min. 75 %

2.3.4. Gradasi Agregat

Gradasi agregat adalah distribusi ukuran butir agregat yang digunakan dalam campuran konstruksi seperti aspal beton dan campuran beton. Distribusi ukuran butiran ini sangat penting karena mempengaruhi sifat mekanik, stabilitas, kekuatan, dan kepadatan campuran. Keefektifan campuran konstruksi dapat

dioptimalkan dengan menyesuaikan gradasi agregat. Ada beberapa jenis gradasi agregat, seperti (Jenderal & Marga, 2018) :

a. Gradasi seragam (*uniform graded*)

Distribusi butiran agregat yang merata atau teratur dalam campuran bangunan disebut sebagai gradasi seragam, juga dikenal sebagai gradasi konsisten atau gradasi ideal. Ketika agregat dengan ukuran butiran yang berbeda hadir dalam jumlah yang sama, kurva gradasi mendekati garis lurus. Hal ini menandakan bahwa persentase berat agregat untuk setiap fraksi ukuran butir hampir sama atau mendekati nilai yang sama.

b. Gradasi rapat (*Dense graded*)

Gradasi rapat adalah jenis gradasi agregat yang mencakup ukuran partikel mulai dari agregat kasar hingga agregat halus. Gradasi ini juga dikenal sebagai gradasi yang baik atau gradasi yang layak (*well graded*). Agregat dapat dikatakan bergradasi baik apabila persentase yang melewati setiap lapisan gradasi telah memenuhi Rumus *Fuller* seperti berikut:

$$P = 100(d/D)^{0.45} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

P = Persentase melewati penyaringan

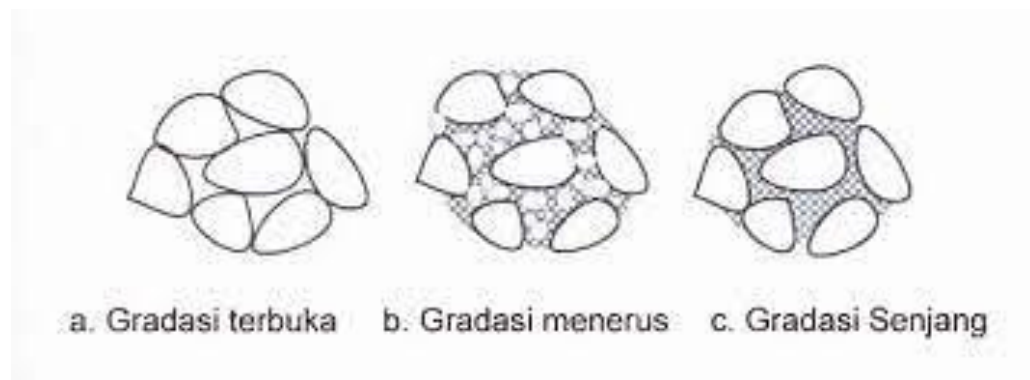
d = Ukuran agregat yang tengah dipertimbangkan

D = Ukuran partikel maksimum dalam distribusi butiran

Kelebihan dari campuran aspal dengan agregat ini adalah Campuran ini sangat stabil, memiliki ketahanan terhadap kebocoran air yang rendah, dan memiliki berat unit yang besar.

c. Gradasi senjang (*Gap graded*)

Gradasi senjang adalah campuran agregat yang tidak sesuai dengan gradasi menerus dan gradasi rapat. Kelebihan dari campuran aspal dengan distribusi butiran ini, campuran mempunyai kemampuan peralihan yang baik dari satu kondisi ke campuran dengan distribusi butiran yang telah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2.1. Gradasi Agregat Berdasarkan Jenisnya

2.3.5. Gradasi Agregat Gabungan

Dalam campuran bangunan seperti beton atau beton aspal, istilah "gradasi agregat gabungan" menggambarkan distribusi ukuran butiran yang meliputi agregat kasar dan agregat halus. Dua fraksi agregat dengan berbagai ukuran butiran disertakan dalam campuran; fraksi-fraksi ini dipilih untuk memberikan sifat dan kinerja yang sesuai. Sifat-sifat campuran harus memasuki ketentuan standar dari spesifikasi Bina Marga 2018 dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Aspal

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos terhadap Total Agregat							
		Stone Matrix Asphalt (SMA)			Lastaston (HRS)		Laston (AC)		
ASTM	(mm)	Tipis	Halus	Kasar	WC	Base	WC	BC	Base
1½"	37,5								100
1"	25			100				100	90 - 100
¾"	19		100	90 - 100	100	100	100	90 - 100	76 - 90
½"	12,5	100	90 - 100	50 - 88	90 - 100	90 - 100	90 - 100	75 - 90	60 - 78
⅜"	9,5	70 - 95	50 - 80	25 - 60	75 - 85	65 - 90	77 - 90	66 - 82	52 - 71
No.4	4,75	30 - 50	20 - 35	20 - 28			53 - 69	46 - 64	35 - 54
No.8	2,36	20 - 30	16 - 24	16 - 24	50 - 72	35 - 55	33 - 53	30 - 49	23 - 41
No.16	1,18	14 - 21					21 - 40	18 - 38	13 - 30
No.30	0,600	12 - 18			35 - 60	15 - 35	14 - 30	12 - 28	10 - 22
No.50	0,300	10 - 15					9 - 22	7 - 20	6 - 15
No.100	0,150						6 - 15	5 - 13	4 - 10
No.200	0,075	8 - 12	8 - 11	8 - 11	6 - 10	2 - 9	4 - 9	4 - 8	3 - 7

2.4 Bottom Ash

2.4.1. Pengertian Bottom Ash

Bottom ash merupakan hasil proses pembakaran yang dilakukan pada tungku pembakaran Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), selanjutnya dikeluarkan dari tungku dengan cara menyemprotkan air sehingga dapat dibuang atau dimanfaatkan sebagai pengisi jalan. *Bottom ash* mampu dibuat dalam jumlah yang besar, maka dari itu diperlukan pengelolaan yang tepat untuk menghindari masalah lingkungan.

Berdasarkan jenis tungkunya, *bottom ash* dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu *dry bottom ash* dan *wet bottom ash*. dari tungku dengan sistem *dry bottom boiler* menghasilkan *dry bottom ash*, sementara tungku dengan sistem *slag-tap boiler* dan *cyclone boiler (boiler slag)* menghasilkan *wet bottom ash*. (Tahir, Wulan, 2015).

2.4.2 Sifat Fisik Bottom Ash



Gambar 2.2. *Bottom Ash*

Mengenai sifat fisik *bottom ash*, termasuk bentuk, warna, penampilan, ukuran, berat jenis, berat isi kering, serta kemampuan penyerapan dari *bottom ash* lembab serta kering, tertera dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Sifat fisik *bottom ash*

Sifat Fisik <i>Bottom Ash</i>	Wet	Dry
Bentuk	Angular / bersiku	Berbutir kecil / granular
Warna	Hitam	Abu-abu gelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (% lolos ayakan)	No. 4 (90-100%)	1.5 s/d ¾ in (100%)
	No. 10 (40-60%)	No. 4 (50-90%)
	No. 40 (10%)	No. 10 (10-60%)
	No. 200 (5%)	No. 40 (0-10%)
Specific gravity	2,3-2,9	2,1-2,7
Dry Unit Weight	960-1440 kg/m ³	720-1600 kg/m ³
Penyerapan	0,3-1,1%	0,8-2,0%

2.4.3 Sifat Kimia *Bottom Ash*

Si, Al, Fe, Ca, Mg, S, Na, dan sejumlah unsur lainnya dapat ditemukan dalam *bottom ash*. Unsur-unsur yang paling melimpah dalam abu dasar adalah SiO₂ (54,8%), Al₂O₃ (21,15%), dan Fe₂O₃ (11,96%). (Hisyam, 2010).

2.4.4 Sifat Mekanis *Bottom Ash*

Berdasarkan penelitian Aggarwal, penggunaan *bottom ash* yang memiliki kandungan karbonat tinggi dan kualitas *pozzolan*, digunakan sebagai pengganti agregat dalam campuran beton. Hal ini menyebabkan beton meningkat secara perlahan pada tahap awal perkerasannya karena sifat *pozzolan* dari *bottom ash*. Namun, setelah dua puluh delapan hari, beton akan memiliki kekuatan yang jauh lebih besar daripada sebelumnya. (Aggarwal et al., 2007)

Dalam *bottom ash* ini terdapat partikel yang mudah pecah berupa kerak batu bara yang memiliki bentuk seperti kembang (*pop-corn* partikel). Kelebihan dari *pop corn* partikel adalah memiliki daya penyerapan yang tinggi karena sangat berpori dan partikel ini mudah hancur akibat pemadatan.

Tabel 2.8. Sifat mekanisme dari *dry* dan *wet bottom ash*

Sifat mekanis	<i>Dry bottom ash</i>	<i>Wet bottom ash</i>
<i>Max. Dry Density</i>	1210 – 1620 kg/m ³	1330 – 1650 kg/m ³
Kelembaban optimum	12–24% (umumnya <20)	8 – 20%
Test Abrasi LA (% kehilangan)	30 – 50	24 – 48
<i>Sodium Sulfat Soundness test</i> (% kehilangan)	1,5 – 10	1 – 9
Kuat geser (sudut geser)	38 – 42° 38 – 45 ° (ukuran butir < 9,5 mm)	38 – 42° 38 – 46° (ukuran butir < 9,5 mm)
CBR (%)	40 – 70	40 – 70
Koefisien permeabilitas	10-2 – 10-3 cm/det	10-2 - 10-3 cm/det
<i>Friable</i> partikel (kerak batu bara)	Ada	Tidak ada

2.4.5 Sifat Fisik pada Wet dan Dry Bottom Ash

Mengenai sifat fisik *bottom ash*, termasuk warna, bentuk, ukuran, penampilan, *dry unit weight*, berat jenis (*specific gravity*), serta kemampuan penyerapan dari *wet* dan *dry bottom ash*, dapat ditemukan dalam Tabel 2.8.

Tabel 2.9. Sifat Fisik pada Wet dan Dry Bottom Ash

Sifat Fisik <i>Bottom Ash</i>	<i>Wet</i>	<i>Dry</i>
Bentuk	Angular / bersiku	Berbutir kecil / granular
Warna	Hitam	Abu-abu gelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (% lolos ayakan)	No.4 (90-100%) No.10 (40-60%) No.40 (5-10%) No.200 (0-5%)	1.5 s/d 3/4 in (100%) No.4 (50-90%) No.10 (10-60%) No.40 (0-10%)
<i>Specific gravity</i>	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
<i>Dry Unit Weight</i>	960 – 1440 kg/m ³	720 – 1600 kg/m ³
Penyerapan	0,3 – 1,1%	0,8 – 2,0%

2.5 Fly Ash

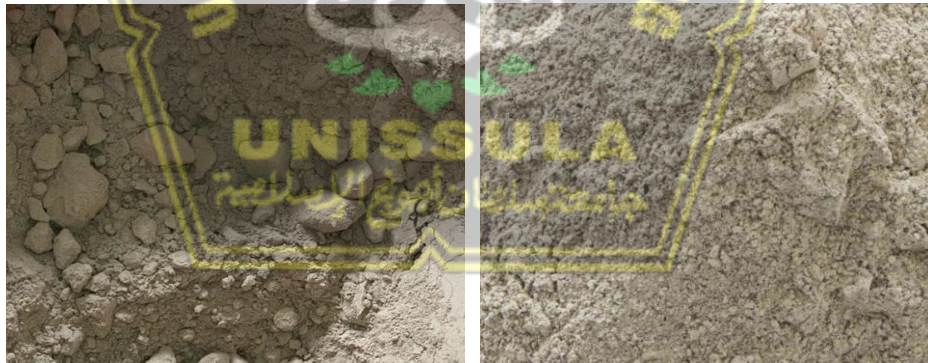
2.5.1 Pengertian Fly ash

Fly ash adalah limbah padat yang dihasilkan dari proses pembakaran di tungku Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Limbah ini memiliki tekstur yang sangat halus dan berbentuk bulat dengan diameter berkisar antara 1 μm hingga 150 μm , dengan ukuran rata-rata sekitar 10 μm . Jumlah karbon yang tidak terbakar dalam limbah tersebut menyebabkan *fly ash* memiliki berbagai warna seperti coklat, abu-abu, dan hitam (Munir, 2010).

Fly ash memiliki kandungan bahan semen yang tinggi dan memiliki sifat *pozzolanic*, yang berarti bahwa ia dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dilepaskan selama proses hidrasi semen. Selain itu, *fly ash* juga dapat membentuk senyawa berikatan dengan adanya air pada suhu normal.

Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen dalam campuran aspal, sebagai *pozzolan* karena reaksi yang terjadi antara *fly ash* dan semen. Karena bentuknya yang sangat halus, *fly ash* juga digunakan sebagai *filler*. *Fly ash* juga tahan terhadap sulfat, yang merupakan keuntungan lain. (Setyawan. R., 2007).

2.5.2 Sifat Fisik dan Karakteristik Fly Ash



Gambar 2.3. *Fly Ash*

Secara fisik, *fly ash* menunjukkan kemiripan dengan semen karena memiliki butiran-butiran yang sangat halus. *Fly ash* memiliki *specific gravity* 2,15–2,6 dan warna abu-abu kehitaman, menurut Komite ACI 226. Selain itu, butiran *fly ash* sangat kecil, sekitar 5-27% lolos saringan No. 325 (45 mm).

Menurut laporan ACI Committee 226.3R-87, banyak faktor yang mempengaruhi ukuran dan bentuk partikel *fly ash*. Hal ini termasuk, tetapi tidak terbatas pada, homogenitas batubara asli, ukuran butiran *fly ash* sebelum proses pembakaran, keseragaman proses pembakaran, dan jenis metode pemadatan. Partikel berongga dan partikel dengan bentuk bulat juga memuat lebih sedikit *fly ash*.

2.5.3 Sifat Kimia Fly Ash

Analisis kimia menunjukkan bahwa abu terbang mengandung unsur yang tidak mudah terbakar seperti SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 , yang sebagian besar terdapat pada partikel halus. Namun, unsur karbon dalam abu terbang, yang sebagian besar ditemukan dengan metode "*loss of ignition*", biasanya ditemukan dalam partikel kasar. Oleh karena itu, persentase berat abu terbang yang melewati No. 325 (ASTM C618) merupakan indikator umum kandungan karbon. (Wardani, 2008).

2.6 Penentuan Kadar Aspal Optimum (Cara Marshall)

Metode yang digunakan untuk mencapai komposisi aspal yang optimal yakni dengan metode diagram batang, dimana diagram batang dibuat untuk mengilustrasikan kisaran kadar aspal untuk setiap parameter marshall yang sesuai dengan standar. Berdasarkan pengujian laboratorium terhadap mortar (agregat halus, *filler*, dan aspal), % aspal (dalam berat) dihitung. Pengujian Marshall akan menghasilkan kadar aspal terbaik, dan pada kadar aspal tersebut, syarat-syarat yang tercantum pada Tabel 2.10 yang harus dipenuhi.

Tabel 2.10. Syarat-syarat penentuan kadar aspal

Jenis Pemeriksaan	Persyaratan
Stabilitas (kg)	> 400
Kelelehan (mm)	2 - 4
Rongga dalam campuran (%)	4 - 6
Rongga terisi aspal (%)	65 - 75

2.7 Metode Pengujian

Aspal beton dibentuk dengan menggunakan agregat, aspal, dan material lainnya yang dicampur sampai homogen pada alat dengan suhu tertentu. Adapun perhitungan yang digunakan pada campuran aspal beton, sebagai berikut :

2.7.1 Metode Pengujian Aspal

1. Berat Jenis *bulk* Beton Aspal Padat (Gmb)

Hukum Archimedes dapat digunakan untuk menghitung ukurannya, yaitu

$$Gmb = \frac{\text{Berat Uji Kering}}{\text{Berat Uji Kering Permukaan} - \text{Berat Uji dalam Air}} \dots\dots\dots(2.3)$$

2. Berat Jenis Maksimum beton Aspal yang belum dipadatkan (Gmm/*The Maximum Specific Gravity of the Asphalt Mixture*)

Beton aspal yang tidak dimampatkan memiliki berat jenis maksimum yang diizinkan untuk campuran beton aspal tanpa udara.

$$Gmm = \frac{100}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

Gmm = Berat Jenis Maksimum Material Campuran

Pb = Jumlah Aspal sebagai Persentase dari Total Berat Campuran

Ps = Jumlah Agregat sebagai Persentase dari Total Berat Campuran

Gb = Kepadatan Aspal

Gse= Kepadatan Efektif Agregat

2.7.2 Metode Pengujian Agregat

Dasar perhitungan dalam menghitung agregat sesuai dengan standar Bina Marga Edisi 2018 adalah seperti berikut :

a. Berat Jenis

Berat jenis agregat didefinisikan sebagai rasio kepadatan agregat terhadap kepadatan air. Spesifikasi Umum Bina Marga memiliki persyaratan terkait berat jenis agregat. Terdapat empat jenis berat jenis agregat yang harus diperhatikan sesuai dengan spesifikasi tersebut, meliputi :

1. Berat jenis *Bulk* (*bulk Specific gravity*) adalah menentukan volume total agregat dan berat keringnya.

Perhitungan berat jenis *bulk* pada agregat kasar:

$$Gsb = \frac{Bk}{(B_j - Ba)} \dots\dots\dots (2.5)$$

Perhitungan berat jenis *bulk* pada agregat halus:

$$Gsb = \frac{Bk}{(B + 500 - Bt)} \dots\dots\dots (2.6)$$

2. Berat jenis kering permukaan (*saturated surface dry*) adalah perhitungan berat agregat dalam keadaan kering permukaan.

Perhitungan berat jenis kering permukaan pada agregat kasar:

$$Gssd = \frac{B_j}{(B_j - Ba)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Perhitungan berat jenis kering permukaan pada agregat halus:

$$Gssd = \frac{500}{(B + 500 - Bt)} \dots\dots\dots (2.8)$$

3. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*) adalah perhitungan berat kering agregat dan volume yang tidak dapat diresapi dengan air.

Perhitungan berat jenis semu pada agregat kasar dan halus:

$$Gse = \frac{Gsb + Gsa}{2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Perhitungan berat jenis pada material pengisi (*filler*):

$$Berat\ jenis = \frac{Wt}{W5 - W3} \dots\dots\dots (2.10)$$

b. Penyerapan

Nilai ekonomis dari suatu campuran dapat dipengaruhi melalui penyerapan. Agregat dengan daya serap tinggi menyebabkan aspal terdegradasi. dikarenakan agregat akan terus menyerap aspal selama proses pencampuran aspal dan agregat berlangsung. Sementara itu, agregat dengan daya serap rendah akan menyebabkan adanya keterikatan yang kuat antara aspal dan agregat. Kuantitas air yang dapat ditampung oleh agregat digunakan sebagai proksi untuk kapasitas penyerapannya.

$$\text{Penyerapan agregat kasar} = \frac{(B_j - B_k)}{B_k} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\text{Penyerapan agregat kasar} = \frac{500 - B_k}{B_k} \times 100\% \dots\dots\dots(2.12)$$

Syarat-syarat mengenai berat jenis dan penyerapan agregat sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan oleh Bina Marga pada tahun 2018.

Tabel 2.11. Syarat Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat
Berat Jenis Bulk	SNI 03-1969-1990	Min. 2,5
Berat Jenis SSD		
Berat Jenis Semu		
Penyerapan (%)		Maks. 3%

2.8 Sifat-sifat Campuran Lapisan Aspal Beton

Beberapa sifat-sifat campuran harus sesuai dengan persyaratan yang ditentukan di bawah peraturan Bina Marga 2018, seperti yang dinyatakan dalam Tabel 2.9 di bawah ini.

Tabel 2.12. Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah tumbukan per bidang		75		112 ⁽³⁾
Rasio partikel lolos ayakan 0,075mm dengan kadar aspal efektif	Min	0,6		
	Maks.	1,2		
Rongga dalam campuran (%) ⁽⁴⁾	Min	3,0		
	Maks.	5,0		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min	65	65	65
Stabilitas Marshall (kg)	Min	800		1800 ⁽³⁾
Pelelehan (mm)	Min	2		3
	Maks	4		6 ⁽³⁾
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C ⁽⁵⁾	Min	90		
Rongga dalam campuran (%) pada Kepadatan membal (refusal) ⁽⁶⁾	Min	2		

Dalam kategori karakteristik campuran laston, terdapat beberapa elemen yang mencakup:

2.8.1. Stabilitas

Stabilitas campuran aspal beton (AC) didefinisikan sebagai kemampuannya untuk menopang beban dan tekanan lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk pada jalan itu sendiri. Jalan raya dan infrastruktur lainnya sangat diuntungkan oleh aspal dengan stabilitas tinggi karena memungkinkan untuk menopang beban kendaraan secara efektif tanpa kerusakan yang tidak semestinya atau deformasi permanen. Sesuai persyaratan sifat-sifat campuran Laston, nilai Stabilitas harus memenuhi nilai minimal sebesar 800 kg.

2.8.2. Kelelahan Plastis (*Flow*)

Kapasitas campuran aspal beton (AC) untuk mengalir dan mengisi ruang kosong di antara partikel-partikel ketika dipadatkan selama proses konstruksi disebut sebagai *flow* dalam konteks campuran aspal (aspal campuran). *Flow* ini juga dikenal sebagai deformasi plastis atau deformasi tanpa retak (deformasi plastis).

Flowabilitas campuran aspal sangat penting karena memastikan bahwa campuran dapat beradaptasi dengan struktur jalan dan ketidakrataan di permukaan jalan sekaligus memenuhi profil yang diinginkan. Aliran yang optimal akan membantu pembentukan lapisan aspal beton yang dalam, rata, dan stabil, sehingga meningkatkan daya dukung dan ketahanan jalan terhadap tekanan lalu lintas dan lingkungan. Sesuai dengan persyaratan karakteristik campuran Laston, Nilai *Flow* harus memenuhi nilai minimal 2-4 mm.

2.8.3 Marshall Quotient (MQ)

Untuk mengukur kemampuan adaptasi perkerasan jalan, para insinyur menggunakan metrik yang disebut *Marshall Quotient* (MQ), yang menggambarkan hubungan antara nilai stabilitas dan aliran pada campuran aspal. Sesuai dengan standar persyaratan dari Bina Marga tahun 2018, nilai *Marshall Quotient* paling rendah yang diharapkan adalah sebesar 250 kg/mm, dan formula untuk menghitungnya diberikan sebagai berikut.

$$s = \frac{q}{r} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

s = Nilai *Marshall Quotient* (kg/mm)

q = Nilai stabilitas (kg)

r = Nilai *flow* (mm)

2.8.4 Void In the Mix (VIM)

Persentase partikel agregat berlapis aspal yang mengandung rongga udara dikenal sebagai volume rongga dalam campuran (VIM). Untuk menghitung volume rongga udara, dapat digunakan suatu rumus yang telah ditentukan.:

$$VIM = 100 - \frac{100 \times \text{berat volume b.u}}{B.J. \text{maksimum teoritis}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Berat jenis maksimum teoritis :

$$B_j = \frac{100}{\frac{\%agr}{B.J. agr} + \frac{\%aspal}{B.J. Aspal}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

VIM = Bagian yang berisi udara dalam campuran setelah proses pemadatan (%)

B.J Teoritis = Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (gr/cc)

2.8.5 Void in the Mineral Agregat (VMA)

Bagian yang berisi udara dan volume aspal efektif (volume aspal yang tidak terserap oleh agregat) membentuk rasio rongga agregat mineral, atau VMA, pada perkerasan. Terdapat rumus standar untuk menentukan VMA :

$$VMA = 100 - \frac{(100 - \%aspal) \times \text{berat volume b.u}}{B.J. Agregat} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

VMA = Bagian yang berisi udara pada mineral agregat (%)

% Aspal = Kadar aspal terhadap campuran (%)

BJ Agregat = Berat jenis efektif

2.8.6 Void Filled by Bitumen (VFB)

Aspal yang tidak terserap oleh setiap butiran agregat inilah yang membentuk VFB dalam VMA yang terisi. Hasilnya, aspal VFB adalah aspal yang digunakan untuk

menutupi partikel agregat dalam beton aspal padat, atau persentase volume beton aspal padat yang digunakan untuk menutupi aspal.

$$VFB = \frac{100.(VMA - VIM)}{VMA} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

VFB = Pori antar butir agregat yang terisi aspal (%) dari VMA

VIM = Presentase aspal terhadap volume campuran (%)

VMA = Presentase dari volume *bulk* beton aspal (%)

2.9 Pengujian Ekstraksi

Menurut prosedur pemeriksaan AASTHO (T-164-80), Metode Ekstraksi telah ditetapkan sebagai salah satu cara untuk menguji komposisi aspal dalam campuran (*Mix design*). Ekstraksi adalah proses memisahkan dua atau lebih elemen dari suatu kombinasi dengan memasukkan pelarut yang dapat melarutkan salah satu komponen dalam campuran. (Dwipayana, 2018)

Uji ekstraksi menunjukkan bahwa banyak partikel agregat yang dihancurkan meningkatkan volume rongga udara dalam campuran, yang mengakibatkan penurunan kepadatan serta peningkatan pada VIM dan VMA.

Uji ekstraksi digunakan untuk menentukan jumlah aspal dalam campuran beton aspal. Uji ini diperlukan selama proses *Job Mix Design* (JMD) untuk menjamin bahwa kandungan aspal dalam campuran beton aspal sesuai dengan kriteria teknis dan kinerja yang diinginkan.

Standar SNI 03-3640-1994 diimplementasikan pada alat uji kadar aspal ini.

1. Tabung refluks kaca yang dilengkapi dengan sistem pendingin uap pelarut, rangka, dan keranjang benda uji digunakan untuk menguji ekstraksi kadar aspal.
2. Filter atau kertas saring
3. layar asbes dan pelat pemanas listrik
4. Timbangan yang dapat mengukur hingga tingkat 0,1 gram
5. Trikloroetilen adalah pelarut
6. Oven
7. Baskom



Gambar 2.4. Alat Refluks

2.10 Job Mix Design

Job mix design merupakan pembuatan campuran aspal beton guna menentukan layak atau tidaknya rencana campuran tersebut. Tujuan dari percobaan *job mix design* adalah mencampurkan agregat dengan aspal berdasarkan ukuran dan komposisi yang telah ditentukan, dari campuran tersebut dapat ditentukan kadar aspal optimal melalui tahap pemeriksaan selanjutnya.

Job Mix Design adalah prosedur utama dalam produksi campuran beton aspal berkualitas tinggi yang sesuai dengan keadaan lingkungan dan beban lalu lintas yang dihadapi oleh jalan atau infrastruktur lainnya. Dengan melaksanakan *Job Mix Design* secara tepat, maka dapat dipastikan bahwa campuran beton aspal dapat bekerja dan bertahan sesuai dengan kriteria dan spesifikasi teknis yang berlaku.

2.11 Penelitian Terdahulu yang Sejenis

PENELITI	JUDUL	METODE	VARIABEL	HASIL
M. Zainul Arifin, M. Sadillah, Achmad Wicaksono (2018)	The influence of a coal fly ash filler on the resilience modulus of wear-coated asphalt concrete	beton aspal diukur dengan menggunakan alat UMATTA.	abu terbang, bahan pengisi, modulus resiliensi, lapisan aus	Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa <i>coal fly ash filler</i> memiliki kemampuan untuk mengurangi pengaruh temperatur tanah dan membuat tanah lebih kuat, membuatnya lebih tahan terhadap kerusakan.
Lizar (2017)	The influence of changes in fly ash and bottom ash on the qualities of flexible pavement is investigated	menguji sifat-sifat bahan dasar, dan kemudian mencari tahu kandungan aspal terbaik.	Perkerasan Lentur, <i>Filler</i> , <i>Fly Ash</i> , Aspal Beton, Uji Marshall, Karakteristik <i>Fly Ash</i>	Pada pengujian ini, stabilitas mendapatkan nilai rata-rata meningkat 25% untuk benda uji yang menggunakan bahan pengisi abu batu.
Supriadi Djua (2018)	Laboratory Performance with the Use Classification for Concrete Made from Asphalt Containing Fly Ash Used as a Partial Replacement Filler in Concrete	Metode uji Marshall digunakan dalam penelitian ini.	<i>Fly Ash</i> Batu Bara, AC-WC, Marshall. Spesifikasi Umum bina marga 2010	Kadar aspal yang direkomendasikan (KAO) adalah 6%. Campuran optimum memiliki nilai stabilitas maksimum 2,329 kg, dengan kisaran 1,5% <i>fly ash</i> .
Anas Tahir (2009)	CHARACTERISTICS OF ASPHALT CONCRETE MIXTS (AC-WC) USING VARIATION OF COAL FLY ASH FILLER CONTENT	Penelitian ini menggunakan metode eksperimen	Campuran Beton aspal, Abu terbang batubara, Karakteristik Marshall	<i>fly ash</i> batubara mengandung 4% <i>filler</i> , maka nilai stabilitas akan meningkat dengan penambahan <i>filler fly ash</i> .
Anas Tahir dan Andi Tenri Wulan (2015)	THE IMPACT THAT CHANGES IN BOTTOM ASH AND STONE ASH HAVE	Penelitian menggunakan metode pengujian	<i>bottom ash</i> , abu batu, stabilitas, fleksibilitas,	Kadar aspal yang digunakan bervariasi antara 0%, 25%, dan

	HAD ON THE CHARACTERISTICS OF THE CONCRETE MIXTURE THAT WAS COATED WITH ASPHALT (AC – WC)	Marshall untuk mengetahui karakteristik Standar untuk campuran dapat ditemukan dalam SNI dan Bina Marga.	durabilitas, AC-WC.	50%. Kadar aspal terbaik dengan variasi kadar aspal 0%, 25%, dan 50% berturut-turut adalah 985,742 kg, 990,989 kg, dan 996,466 kg..
Daud Nawir, Muhammad Djaya Bakri, Iif Ahmad Syarif (2017)	CHARACTERISTICS ANALYSIS OF ASPHALT CONCRETE AC-WC USING VARIATION OF FILLER BOTTOM ASH CONTENT	Untuk mendapatkan data, uji variabilitas sampai memenuhi syarat tertentu.	-Aspal Beton -Filler -Bottom Ash -Marshall -KAO	Dengan nilai stabilitas 1361,8 kg dan nilai kelelahan 3,9 mm, maka kadar aspal yang optimal adalah kadar filler abu dasar 7%.

1. Sedangkan Penelitian M. Zainul Arifin, M. Sadillah, Achmad Wicaksono (2018) dengan judul "Pengaruh penggunaan abu terbang batubara sebagai filler terhadap modulus resilien beton aspal berlapis aus", Pengaruh *filler* abu terbang batubara terhadap modulus ketahanan beton aspal berlapis aus diselidiki dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil penelitian, *filler* abu terbang batubara dapat mengurangi dampak temperatur di lapangan dan meningkatkan kekakuan beton.
2. Penelitian Lizar (2017) dengan judul Analisis Pengaruh *fly ash* dan *bottom ash* terhadap fungsionalitas perkerasan lentur dapat ditelusuri kembali ke titik asalnya. *Fly ash* serta *bottom ash* digunakan sebagai material pengisi, dengan rasio 7% dari total berat campuran, dan dampak perbedaan asal *fly ash* serta *bottom ash* terhadap kinerja perkerasan lentur dieksplorasi. Jumlah aspal yang optimal dihitung setelah menganalisis kualitas dasar material. Pada suhu 150°C, sampel dikompresi dalam dua tumbukan. Spesimen dikeringkan selama 30 menit pada suhu 60°C sebelum uji Marshall, dan penyerapan abu terbang dan abu dasar diperkirakan. Analisis ini menunjukkan bahwa bahan baku penelitian telah memenuhi persyaratan kualitas Standar Nasional Indonesia (SNI) secara keseluruhan.

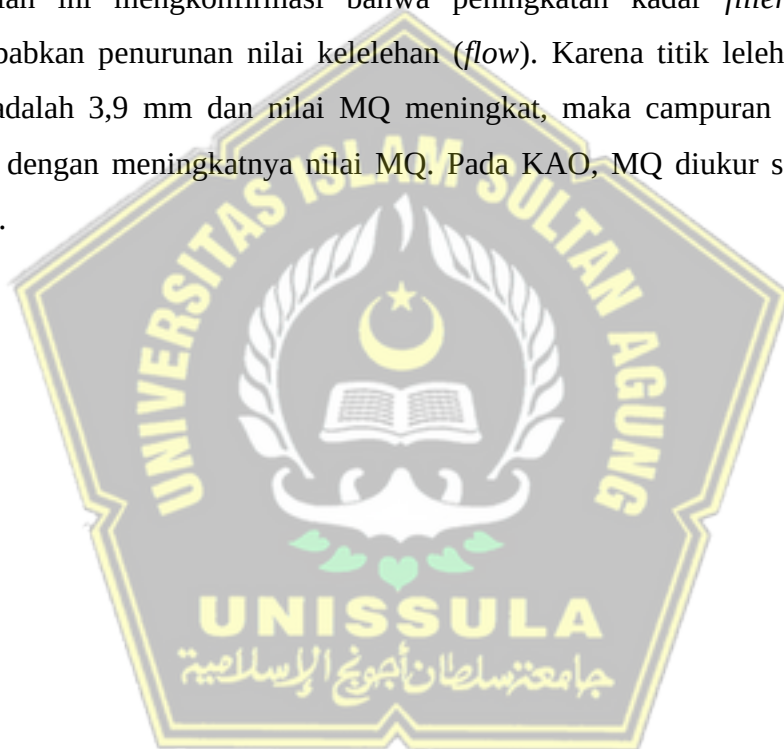
3. Penelitian Supriadi Djua (2018) dengan judul Kinerja Laboratorium Menggunakan Abu Terbang sebagai Pengganti Sebagian *Filler* pada Campuran Aspal Beton-*Wearing Course* (AC-WC). Metode uji Marshall digunakan dalam investigasi ini, sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2010 (revisi 3). Agregat yang digunakan adalah AMP PT. *Petra Award for Prosperity* (Joglo), dengan Kadar Aspal Optimum (KAO) campuran sebesar 6% dan variasi *fly ash* sebesar 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%. KAO (kadar aspal optimum) yang digunakan adalah 6%, dengan variasi campuran *fly ash* 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%. Secara umum, semua variasi *fly ash* memenuhi standar kinerja Marshall, namun campuran terbaik dimiliki oleh benda uji dengan variasi *fly ash* 1,5% dengan nilai stabilitas maksimum 2,329 kg. Kepadatan 2,396; VIM 3,772; VMA 15,079; flow 3,160; MQ 769,965; VFB 74,985; dan TFA 9,60.

4. Penelitian Anas Tahir (2009) Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengetahui pengaruh perubahan kadar *filler* abu terbang batubara pada campuran beton aspal (Ac-Wc). Data menunjukkan bahwa ketika abu terbang batubara digunakan sebagai material pengisi dalam pembuatan beton aspal, jumlah bahan pengisi bervariasi antara 4%, 5%, 6%, 7%, dan 8% dari keseluruhan campuran. *Filler* abu terbang batubara akan mempengaruhi kinerja campuran beton aspal, menurut data. Ketika lebih banyak abu terbang batubara digunakan sebagai pengisi, nilai output meningkat. Dengan kenaikan sebesar 14,87 persen, dari 4% menjadi 8%, campuran terlihat lebih kaku dan memiliki nilai durabilitas yang lebih tinggi. Dengan variasi kadar *filler* abu terbang batubara sebesar 4%, campuran memiliki nilai durabilitas sebesar 91,433%, dan dengan perubahan kadar *filler* abu terbang batubara sebesar 8%, campuran memiliki nilai durabilitas sebesar 91,433%.

5. Penelitian Anas Tahir dan Andi Tenri Wulan (2015) dengan judul Analisis Pengaruh Variasi Abu Dasar dan Abu Batu Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC - WC), Untuk mengetahui sifat-sifat campuran dalam kaitannya dengan SNI dan Standar Bina Marga, penelitian ini menggunakan metode uji *Marshall*. *Bottom ash* berpengaruh terhadap stabilitas, kelelahan, durabilitas, densitas, VIM, VMA, VFB, dan flow, seperti yang ditunjukkan oleh penelitian ini. Karena variasi *bottom ash* 75% dan 100% tidak menghasilkan

komposisi aspal yang diinginkan, maka digunakan variasi 0%, 25%, dan 50%. Nilai 985.742 kg, 990.989 kg, dan 996.466 kg diperoleh untuk campuran aspal beton dengan 0%, 25%, dan 50% perubahan bottom ash.

6. Penelitian Daud Nawir, Muhammad Djaya Bakri, Iif Ahmad Syarif (2017) berjudul Analisis Sifat Campuran Aspal dan Beton AC-WC. Mengubah Persentase *Bottom Ash* yang Digunakan sebagai Pengisi. Informasi dikumpulkan melalui pengujian berulang-ulang terhadap variabel hingga ditemukan nilai yang memenuhi serangkaian kriteria. Berdasarkan hasil penelitian ini, nilai stabilitas optimal ditentukan sebesar 1361,8 kg, dengan kadar *filler bottom ash* sebesar 7%. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa peningkatan kadar *filler bottom ash* menyebabkan penurunan nilai kelelehan (*flow*). Karena titik leleh pada kondisi KAO adalah 3,9 mm dan nilai MQ meningkat, maka campuran menjadi kaku seiring dengan meningkatnya nilai MQ. Pada KAO, MQ diukur sebesar 392,36 kg/mm.



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Teknik eksperimen adalah pendekatan studi yang digunakan untuk menemukan dan memahami dampak dari perlakuan khusus terhadap variabel lain di bawah pengaturan yang terkendali dengan baik. (Jaya et al, 2019).

Menurut para ahli, penelitian eksperimental adalah jenis penelitian yang dilakukan untuk menemukan dampak dari pemberian terapi tertentu pada subjek penelitian. Dalam penelitian eksperimen ini, penulis berupaya untuk mengumpulkan data-data kuantitatif terkait dengan penelitian tersebut. Data yang digunakan untuk menganalisis pendekatan kuantitatif berupa angka-angka atau data berbentuk numerik.

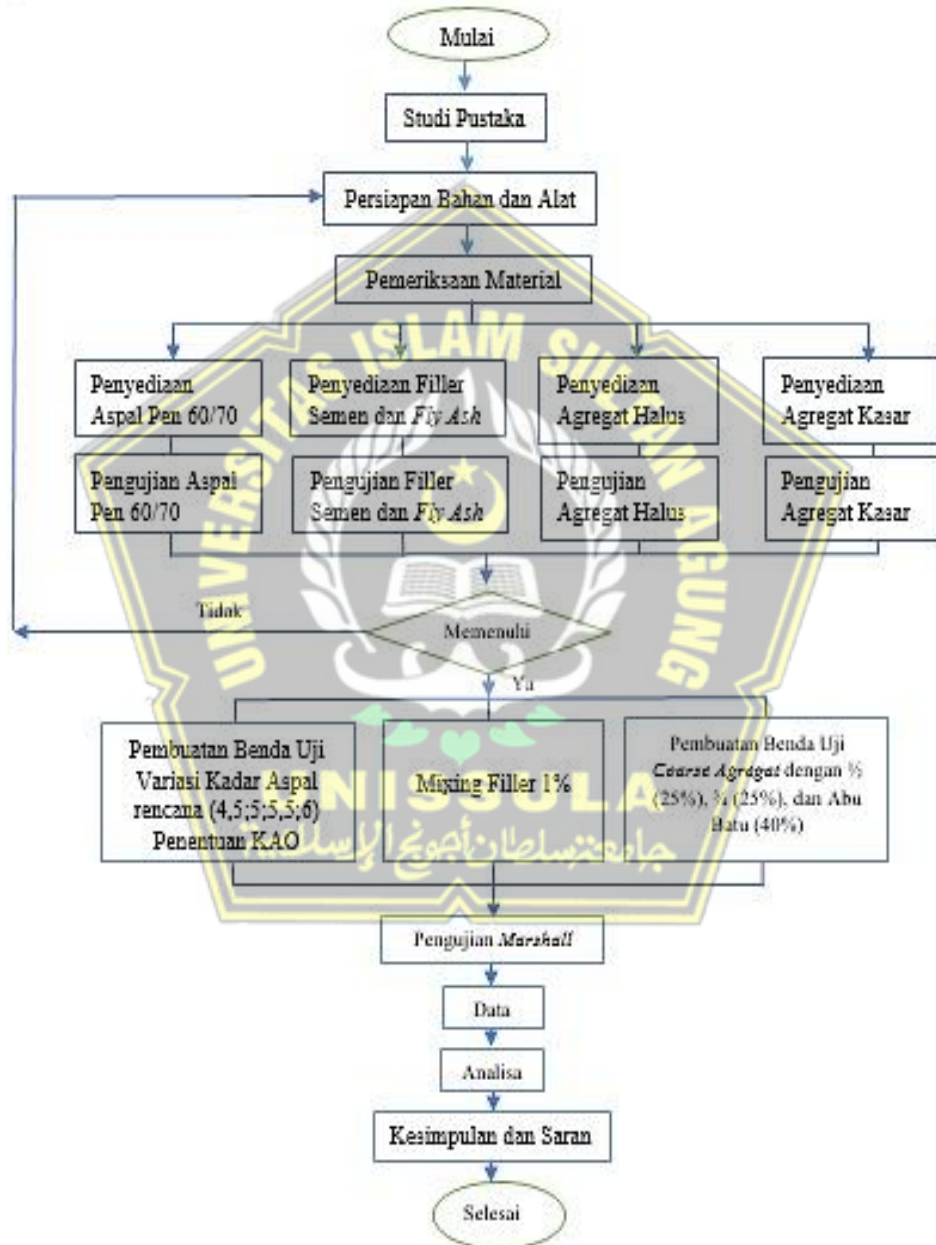
Menurut (Jaya et al, 2019) dalam bidang pendidikan, Studi eksperimental dapat diklasifikasikan sebagai studi laboratorium atau studi lapangan. Dalam investigasi ini, pengujian aspal dan agregat dilakukan di laboratorium sebagai bagian dari metodologi eksperimental.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah mengidentifikasi pertanyaan yang perlu dipecahkan, judul penelitian ini adalah "*Analisis Pengaruh Bottom Ash dan Fly Ash sebagai Bahan Pengganti pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)*". Sumber primer dan sekunder digunakan untuk analisis ini. Data primer diperoleh dari percobaan yang dilakukan secara langsung oleh peneliti di laboratorium, mengacu pada petunjuk manual yang telah tersedia.

Data sekunder, di sisi lain, merupakan informasi yang dikumpulkan secara tidak langsung dari penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas topik dan/atau jenis data yang serupa dan karenanya masih relevan dengan penelitian saat ini. Sebagai contoh, data sekunder pada penelitian ini mencakup kadar *fly ash*. Hasil akhir dari penelitian ini berupa kesimpulan yang didapatkan melalui analisis data yang telah diolah. Proses penelitian ini dapat diikuti melalui diagram alir yang tertera dalam Gambar 3.1.

3.2. Rancangan dan Pelaksanaan Penelitian

Laboratorium Transportasi di Universitas Islam Sultan Agung di Semarang menjadi lokasi penelitian ini. Langkah awal dalam penelitian ini adalah melakukan tinjauan literatur yang ada, diikuti dengan pengumpulan data. Bagan alir 3.1 memberikan gambaran umum tentang proses penelitian yang digambarkan dalam grafik alur penelitian.



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

3.3 Studi Literatur

Pada tahap ini, merupakan langkah awal di mana penulis melakukan pencarian terkait semua materi yang diperlukan dan akan digunakan sebagai referensi dalam pelaksanaan penelitian, pengolahan data, dan penyusunan skripsi.

3.4 Bahan dan Peralatan Penelitian

Pada tahap ini, peneliti akan mempersiapkan semua bahan dan perlengkapan yang diperlukan dalam penelitian. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memastikan bahwa penelitian berjalan dengan lancar dan sesuai rencana.

Di antara peralatan dan perlengkapan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

3.4.1 Bahan Penelitian

Berikut ini adalah beberapa bahan yang digunakan dalam penelitian ini, seperti :

- a) Agregat kasar, agregat halus dari hasil pemecahan batu.
- b) Aspal Pertamina, yang memiliki standar penetrasi 60/70, digunakan untuk penelitian ini.
- c) *Filler* yang digunakan merupakan campuran antara semen *Portland* dan *fly ash*.
- d) Material agregat kasar dalam penelitian ini memiliki kandungan yang bervariasi antara $\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{4}$ " dan 40% abu batu.

3.4.2 Perlengkapan Penelitian

- a) Alat penguji untuk agregat dan material pengisi

Peralatan yang digunakan dalam pengujian agregat mencakup tes abrasi dengan mesin *Los Angeles*, penyusunan gradasi agregat menggunakan saringan, peralatan untuk menentukan kepadatan, termasuk oven untuk pengeringan, timbangan, pemanas, dan piknometer, tangki perendaman, dan tabung Ekuivalen Pasir, dan timbangan.

b) Alat penguji aspal

Alat uji penetrasi, alat uji titik nyala dan titik bakar, alat uji titik lembek dan daktilitas, alat uji kelarutan dan berat jenis (timbangan dan piknometer), dan peralatan pengujian densitas, semuanya dipergunakan dalam pengujian aspal.

c) Peralatan pengujian campuran dengan metode Marshall.

Alat uji yang digunakan yaitu alat *Marshall*, meliputi :

1. *Marshall* press berkapasitas 3000 kg dengan kepala tekanan melengkung dan cincin uji serta pengukur lelehan plastik (*flow meter*).
2. Pelat dan leher sambungan disertakan dalam sistem pencetakan spesimen silinder yang dapat mengakomodasi silinder Marshall normal dan modifikasi (diameter 10,2 cm, tinggi 7,5 cm, dan diameter 15,24 cm, tinggi 9,52 cm).
3. *Marshall* yang umum digunakan adalah silinder dengan diameter 9,8 cm, dengan berat 4,5 kg dan tinggi jatuh bebas 45,7 cm.
4. *Ejektor* untuk mengeluarkan benda uji yang dipadatkan.
5. Penangas air yang dikontrol suhu (bak rendam).
6. Peralatan seperti kompor, termometer, mangkuk pengaduk, sendok, kipas angin, handuk, sarung tangan karet, spatula, penggaris, satu set timbangan, dan spidol untuk memberi label pada benda yang akan diuji.

3.5 Pengujian Bahan Penelitian

3.5.1 Pengujian Material Aspal

Aspal Pertamina dengan standar penetrasi 60/70 digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.1 memberikan rincian lebih lanjut tentang persyaratan penggunaan aspal.

Tabel 3.1. Ketentuan Penggunaan Aspal Penetrasi 60/70

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen 60/70
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 06-2456-1991	60-70
Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	>48
Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432-2011	>100
Titik Nyala (°C)	SNI 2432-2011	>232
Berat Jenis	SNI 2441-2011	≥1,0
Viskositas Dinamis 60 °C (Pa.S)	SNI 06-6441-2000	160-240
Viskositas Kinematis 135 °C (cSt)	SNI 06-6441-2000	≥300
Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-03	≥90
Pengujian Residu Hasil TFOF (SNI 06-2440-1991) atau RTFOT (SNI 03-6835-2002)		
Berat yang hilang (%)	SNI 06-2441-1991	≤0.8
Viskositas Dinamis 60 °C (Pa.S)	SNI 03-6441-2000	≤800
Penetrasi pada 25 °C (%)	SNI 06-2456-1991	≥54
Daktilitas pada 25°C (%)	SNI 2432:2011	≥100

3.5.2. Pengujian Material Agregat

Material diperiksa untuk memastikan bahwa material tersebut memenuhi aturan yang diuraikan dalam Spesifikasi Umum untuk Bina Marga (2018), yang didasarkan pada standar pengujian. Dalam pemeriksaan ini, agregat halus serta agregat kasar digunakan. Agregat yang tidak melewati saringan nomor 4 (4,75 mm) saat basah dianggap agregat kasar, dan harus memenuhi kriteria seperti kebersihan, kekerasan, ketahanan, serta tidak mengandung lempung atau materi lain. Persyaratan khusus untuk agregat kasar dapat ditemukan dalam Tabel 3.2.

Sementara itu, agregat halus mengacu pada pasir atau hasil penyaringan batu pecah yang melewati ayakan No. 4 (4,75 mm), dan dapat diperoleh dari berbagai sumber. Agregat halus juga harus memenuhi kriteria seperti kebersihan, kekerasan, tidak mengandung lempung atau materi lain, serta persyaratan lain yang tercantum dalam Tabel 3.3

Pemeriksaan agregat kasar dan halus meliputi :

- a. Berat Jenis Agregat Kasar dan Penyerapan Agregat Kasar menurut SNI 1969:2008.
- b. Indeks Keausan Agregat Kasar (sesuai dengan SNI 2417:2008).

- c. Partikel Pipih serta Lonjong (berdasarkan ASTM D 4791-95).
- d. Kelekatan Agregat Aspal (sesuai SNI-06-2439-1991).
- e. Pengujian Kesehatan Bentuk Agregat atau Pengujian Sifat Agregat (sesuai SNI 3407:2008).
- f. Kepadatan Agregat Halus (menggunakan SNI 1970:2008 sebagai acuan) dan Penyerapan Agregat Halus (berdasarkan SNI 1970:).
- g. Memeriksa butiran (menggunakan SNI-M-02-1994-03 sebagai dasar).

3.5.3. Bahan Pengisi (*filler*)

Kadar *filler*, dinyatakan sebagai persentase dari berat agregat, harus antara 1% dan 3% sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Dalam percobaan ini, kami menggunakan kadar *filler* sebesar 1% untuk memastikan bahwa semua variabel telah dikontrol.

3.6. Pemilihan Gradasi Agregat

Proses penyebaran ukuran partikel agregat dikenal sebagai gradasi agregat. Gradasi agregat memiliki pengaruh terhadap volume rongga dalam campuran serta penilaian kinerja campuran aspal ditentukan dalam penelitian ini. Gradasi campuran harus mematuhi batas-batas yang sesuai dengan Tabel 3.2 dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

Tabel 3.2. Ketentuan Gradasi Agregat Laston AC-WC

Ukuran Ayakan		Kumulatif Berat Lolos Terhadap Total Agregat (%)	
ASTM	(mm)	Batas Bawah	Batas Atas
3/4"	19	100	100
1/2"	12,5	90	100
3/8"	9,5	77	90
No. 4	4,75	53	69
No. 8	2,36	33	53
No. 16	1,18	21	40
No. 30	0,6	14	30
No. 50	0,3	9	22
No. 100	0,15	6	15
No. 200	0,075	4	9

3.7. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Ketika merancang campuran beton aspal, menentukan kadar aspal yang ideal merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa campuran tersebut mencapai tingkat kualitas dan kinerja tertinggi. Persentase dari total berat campuran yang secara optimal menyeimbangkan stabilitas, kekuatan, dan kekakuan campuran dikenal sebagai kadar aspal optimal.

Nilai kadar aspal optimum (KAO) merupakan titik awal untuk menghitung kadar KAO yang ideal. Setiap benda uji dibuat dengan variasi kadar aspal estimasi yang berbeda, dengan kenaikan dan penurunan sebesar 0,5% dari nilai kadar aspal tengah.

3.8. Pembuatan Benda Uji

Pada tahap ini, penulis melakukan perhitungan untuk menentukan jumlah benda uji yang diperlukan, serta kebutuhan material untuk setiap benda uji tersebut. Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah benda uji dengan penambahan *bottom ash* dan *fly ash* pada masing-masing sampel sebesar 0%, 30% dan 50%. Setelah benda uji ditambahkan dengan *bottom ash* dan *fly ash*, dilakukan proses perendaman dilakukan terus menerus selama sehari penuh, dan kemudian dilanjutkan dengan perendaman tambahan dalam *water bath* selama 30 menit.

3.9. Pengujian Marshall

Uji Marshall digunakan untuk memastikan nilai stabilitas, kelelahan (flow), dan nilai parameter Marshall seperti VIM, VMA, VFB. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi apa yang terjadi pada campuran beton aspal AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*) ketika semakin banyak *fly ash* dan *bottom ash* yang ditambahkan ke dalamnya.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pengujian agregat, pengujian penetrasi aspal (60/70), penggunaan bahan pengganti agregat dalam campuran dan pengujian lapangan lainnya akan dibahas dalam bab ini. dan. Berikut adalah hasil yang telah diperoleh dari penelitian tersebut :

4.1. Hasil Pengujian Bahan

4.1.1. Hasil Pengujian Aspal Pertamina Penetrasi 60/70

Laboratorium Transportasi Jalan di Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung di Semarang merupakan sumber data aspal yang digunakan dalam penelitian ini. Aspal yang digunakan memenuhi persyaratan Spesifikasi Pemeriksaan Jalan No. 01/MN/BM/1976 Transportasi dan memiliki spesifikasi penetrasi 60/70. Aspal ini diproduksi oleh Pertamina. Aspal keras diuji dengan berbagai cara, termasuk berat jenis, keuletan, titik nyala, dan penetrasi. Tabel 4.1 menampilkan hasil analisis dari pengujian aspal.

Tabel 4.1. Data Pengujian Aspal Pertamina Penetrasi 60/70

Jenis Pengujian	Hasil Uji	Spesifikasi Aspal Modifikasi Tipe II	Metode Pengujian	Satuan
Original				
Penetrasi pada 25 °C	65	Dilaporkan	SNI 24556:2011	0.1 mm
Titik Lembek	48,75	Dilaporkan	SNI 24556:2012	°C
Titik Nyala (COC)	357	≥ 230	SNI 24556:2013	°C
Daktilitas	151,5	-	SNI 06-2432-1991	Cm
Berat Jenis Bitumen Keras	1,034	-	SNI 244:2011	gr/ml
RTFOT				
Kehilangan (RTFOT) *	0,265	≤ 0.8	SNI 03-6835-2002	%
Penetrasi pada 25 °C setelah RTFOT	92	≥ 54	SNI 2456:2011	%
Daktilitas setelah RTFOT	61	≥ 50	SNI 06-2432-1991	Cm

4.1.2. Pemeriksaan Gradasi Agregat

Untuk menghitung rasio antara agregat kasar, agregat sedang, dan agregat halus, langkah awal adalah dengan mengukur jarak yang sama dari kurva gradasi agregat ke arah luar. Setelah itu, kita dapat menemukan nomor saringan terdekat yang memotong garis dari kurva luar.

Pengujian dilakukan dengan saringan mulai dari No. 3/8 hingga No. 200 untuk agregat halus, sedangkan garis perpotongan antara No. 1 dan No. 1/2 terlihat untuk agregat kasar dan sedang. Bahan-bahan yang digunakan dalam percobaan ini adalah batu pecah untuk agregat kasar, pasir untuk agregat halus, dan abu batu, *fly ash*, serta *bottom ash* untuk *filler*. Tabel 4.2-4.6 merinci hasil analisis pengayakan.

Tabel 4.2. Hasil Pemeriksaan analisis saringan agregat kasar 3/4 inch.

No. Saringan	Ukuran (mm)	Persentase Lolos Saringan
1"	25	100,00
3/4"	19	100,00
1/2"	12,7	71,93
3/8"	9,5	25,96
#4	4,75	1,57
#8	2,36	0,83
#16	1,18	1,18
#30	0,6	0,27
#200	0,075	0,26

Pada analisis saringan agregat kasar 3/4" menunjukkan bahwa persentase agregat yang lolos saringan bernilai 100% tertahan pada saringan 1/2" atau 12,7 mm dengan persentase lolos saringan yaitu 71,93%.

Tabel 4.3. Hasil Pemeriksaan analisis saringan agregat kasar ½"

No. Saringan	Ukuran (mm)	Persentase Lolos Saringan
1"	25	100,00
¾"	19	100,00
½"	12,7	100,00
3/8"	9,5	85,84
#4	4,75	33,32
#8	2,36	4,61
#16	1,18	49,24
#30	0,6	1,89
#200	0,075	0,83

Pada analisis saringan agregat kasar ½" menunjukkan bahwa persentase agregat yang lolos saringan bernilai 100% tertahan pada saringan 3/8" atau 9,5 mm dengan persentase lolos saringan yaitu 85,84%.

Tabel 4.4. Hasil Pemeriksaan analisis saringan Abu Batu

No. Saringan	Ukuran (mm)	Persentase Lolos Saringan
1"	25	100,00
¾"	19	100,00
½"	12,7	100,00
3/8"	9,5	100,00
#4	4,75	100,00
#8	2,36	77,95
#16	1,18	49,24
#30	0,6	32,12
#200	0,075	8,01

Pada analisis saringan abu batu menunjukkan bahwa persentase agregat yang lolos saringan bernilai 100% tertahan pada ayakan No. 8, yang setara dengan 2,36 mm dengan persentase lolos saringan yaitu 77,95%.

Tabel 4.5. Hasil Pemeriksaan analisis saringan pasir

No. Saringan	Ukuran (mm)	Persentase Lolos Saringan
1"	25	100,00
$\frac{3}{4}$ "	19	100,00
$\frac{1}{2}$ "	12,7	100,00
$\frac{3}{8}$ "	9,5	100,00
#4	4,75	100,00
#8	2,36	91,83
#16	1,18	82,76
#30	0,6	58,11
#200	0,075	6,06

Pada analisis saringan abu batu menunjukkan bahwa persentase agregat yang lolos saringan bernilai 100% tertahan pada ayakan No. 8, yang setara dengan 2,36 mm dengan presentase lolos saringan yaitu 91,83%.

Tabel 4.6. Hasil Pemeriksaan analisis saringan *filler*

No. Saringan	Ukuran (mm)	Persentase Lolos Saringan
1"	25	100,00
$\frac{3}{4}$ "	19	100,00
$\frac{1}{2}$ "	12,7	100,00
$\frac{3}{8}$ "	9,5	100,00
#4	4,75	100,00
#8	2,36	100,00
#16	1,18	100,00
#30	0,6	100,00
#200	0,075	98,64

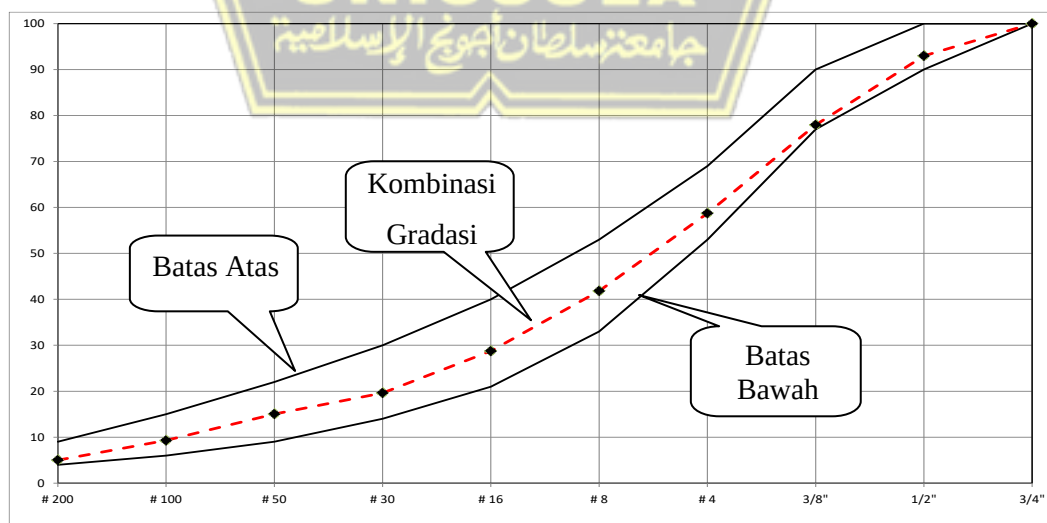
Pada analisis saringan abu batu menunjukkan bahwa persentase Agregat yang tertahan di ayakan No. 200 atau 0,075 mm adalah 100% dari total keseluruhan dengan presentase lolos saringan yaitu 98,64%.

Detail presentasi gradasi dari masing-masing komponen agregat dapat ditemukan dalam Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7. Gradasi Campuran AC-WC

Uraian			1"	3/4"	1/2"	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	# 100	# 200
Inch			1"	3/4"	1/2"	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	# 100	# 200
mm			25	19	12,7	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Data Material													
Batu Pecah Max 3/4'			100,00	100,00	71,93	25,96	1,57	0,83	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26
Batu Pecah Max 1/2'			100,00	100,00	100,00	85,84	33,32	4,61	2,10	1,89	1,64	1,33	0,83
Abu Batu			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	77,95	49,24	32,12	24,47	16,10	8,01
Pasir			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	91,83	82,76	58,11	41,90	16,11	6,06
Filler Semen			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,64
Batu Pecah Max 3/4'	25,0%	25,00	25,00	17,98	6,49	0,39	0,21	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Batu Pecah Max 1/2'	25,0%	25,00	25,00	25,00	21,46	8,33	1,15	0,53	0,47	0,41	0,33	0,21	0,21
Abu Batu	40,0%	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	31,18	19,69	12,85	9,79	6,44	3,20	3,20
Pasir	9,0%	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,26	7,45	5,23	3,77	1,45	0,55	0,55
Filler Semen	1,0%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
Total Campuran	100%	100,00	100,00	92,98	77,95	58,72	41,81	28,74	19,62	15,04	9,29	5,01	5,01
Spesifikasi Gradasi													
Max		100	100	100	90	69	53	40	30	22	15	9	9
Min		100	100	90	77	53	33	21	14	9	6	4	4
Toleransi Komposisi													
max		100,00		100,00	88,50	66,00	46,00	33,50	25,00	18,50	12,50	7,50	7,50
min		95,00		90,00	78,50	56,00	40,00	27,50	19,00	12,50	8,50	5,50	5,50
Luas Permukaan Agregat		5,73											

Berdasarkan hasil analisa saringan yang dilakukan terhadap agregat kasar, sebanyak semua komponen agregat terdiri dari Agregat yang dapat melewati saringan berukuran 1/2" dan tertahan pada saringan berukuran 3/8" atau 9,52 mm. Agregat yang dapat melewati saringan berukuran 3/4" dan tertahan pada saringan berukuran 12" atau 12,7 mm merupakan sebanyak 100% dari total sampel analisa saringan sedang. Sementara untuk agregat halus, terdapat pembagian pada setiap saringan sesuai dengan ukuran tertentu.



Gambar 4.1. Gradasi Campuran

Dalam Gambar 4.1. Gradasi campuran, bisa dilihat bahwa campuran ini memenuhi standar Bina Marga 2018 Divisi 6. Berdasarkan perhitungan, persentase agregat terdiri dari 40% FA (*Coarse Aggregate*), 25% MA (*Medium Aggregate*) dan 1% filler. Semua nilai gradasi gabungan berada dalam rentang antara batas minimum dan maksimum yang ditentukan, tidak ada yang berada di bawah batas minimum atau melebihi batas maksimum.

4.2. Rancangan Campuran Aspal (Job Mix Design)

Komposisi aspal yang di rencanakan yaitu *fly ash* dengan kadar 0%, 30%, 50% dan *bottom ash* dengan kadar 0%, 30%, 50%.

Tabel 4.8. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) FA 0% dan BA 0%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	40,0 %	480,0 gram
2.	Pasir	3,0 %	36,0 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Fly Ash	0,0 %	0,0 gram
6.	Bottom Ash	0,0 %	0,0 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

Tabel 4.9. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) FA 50% dan BA 50%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	20,0%	240,0 gram
2.	Pasir	1,5%	18,0 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Fly Ash	20,0 %	240,0 gram
6.	Bottom Ash	1,5 %	18,0 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

Tabel 4.10. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) BA 30% dan FA 0%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	40,0 %	480,0 gram
2.	Pasir	2,1 %	25,2 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Bottom Ash	0,9 %	10,8 gram
6.	Fly Ash	0,0 %	0,0 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

Tabel 4.11. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) FA 50% dan BA 0%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	20,0%	240,0 gram
2.	Pasir	3,0%	36 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Fly Ash	20,0 %	240,0 gram
6.	Bottom Ash	0,0 %	0,0 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

Tabel 4.12. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) FA 0% dan BA 50%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	40,0%	480,0 gram
2.	Pasir	1,5 %	18,0 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Fly Ash	0,0 %	0,0 gram
6.	Bottom Ash	1,5 %	18,0 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram

No	Komposisi	%	Hasil
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

Tabel 4.13. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) FA 30% dan BA 0%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	28,0 %	336,0 gram
2.	Pasir	3,0 %	36,0 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Fly Ash	12,0 %	144,0 gram
6.	Bottom Ash	0,0 %	0,0 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

Tabel 4.14. Rancangan Campuran Aspal (*Job Mix Design*) FA 30% dan BA 30%

No	Komposisi	%	Hasil
1.	Abu Batu	28,0 %	336,0 gram
2.	Pasir	2,1 %	25,2 gram
3.	Medium Agregat	25,0 %	300,0 gram
4.	Coarse Agregat	25,0 %	300,0 gram
5.	Fly Ash	12,0 %	144,0 gram
6.	Bottom Ash	0,9 %	10,8 gram
7.	Filler	1,2 %	14,4 gram
8.	Aspal	5,8 %	69,6 gram
TOTAL		100,0 %	1200,0 gram

4.3. Pembuatan Benda Uji

Berat benda uji keseluruhan 1200 gram digunakan untuk menentukan berat rencana agregat dalam satu cetakan selama produksi benda uji. Agregat dengan presentase masing-masing kemudian dibuat menjadi 3 buah. Setiap kombinasi yang memungkinkan dari konsentrasi *fly ash* dan *bottom ash* diwakili oleh sebuah

sampel dengan tujuan untuk membandingkan hasil antara masing-masing benda uji. Jika salah satu benda uji tidak memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan dalam Bina Marga tahun 2018 revisi 2, sedangkan dua benda uji lainnya sesuai dengan spesifikasi tersebut, maka hasil dari benda uji dapat dibandingkan. Jadi, total keseluruhan benda uji yang dipergunakan berjumlah 21 sampel. Detail dari setiap benda uji bisa ditemukan dalam Tabel 4.15 sebagai berikut.

Tabel 4.15. Rincian Benda Uji

No	Benda Uji	Total
1.	Normal (<i>Fly ash</i> 0% dan <i>Bottom ash</i> 0%)	3 buah
2.	Kombinasi <i>Bottom Ash</i> 30% Abu Batu 70% dan <i>Fly Ash</i> 30% Pasir 70%	3 buah
3.	Kombinasi <i>Bottom Ash</i> 50% Abu Batu 50% dan <i>Fly Ash</i> 50% Pasir 50%	3 buah
4.	Kombinasi <i>Bottom Ash</i> 30% Abu Batu dan <i>Fly Ash</i> 0% Pasir 70%	3 buah
5.	Kombinasi <i>Bottom Ash</i> 0% Abu Batu 50% dan <i>Fly Ash</i> 50% Pasir	3 buah
6.	Kombinasi <i>Bottom Ash</i> 50% Abu Batu dan <i>Fly Ash</i> 0% Pasir 50%	3 buah
7.	Kombinasi <i>Bottom Ash</i> 0% Abu batu 70% dan <i>Fly Ash</i> 30% Pasir	3 buah
Total Keseluruhan Benda Uji		21 buah

4.4. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan sifat karakteristik Marshall seperti Stabilitas, *Flow*, VIM, VFB, dan VMA harus dibuat dari data fisik benda uji untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO), yang kemudian harus memenuhi persyaratan spesifikasi yang tertera pada Tabel 4.16. mengenai VIM kepadatan membal juga ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Menguji semua faktor Marshall dan menggunakan diagram batang yang dihasilkan dapat membantu Anda menemukan persentase aspal yang ideal. Dalam diagram tersebut, Kadar Aspal Optimum diidentifikasi sebagai titik tengah dari

rentang kadar aspal yang memenuhi ketentuan dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Anda dapat melihat gambaran diagram batang ini pada Gambar 4.16 di bawah ini.

Tabel 4.16. Karakteristik campuran AC-WC pada variasi kadar aspal

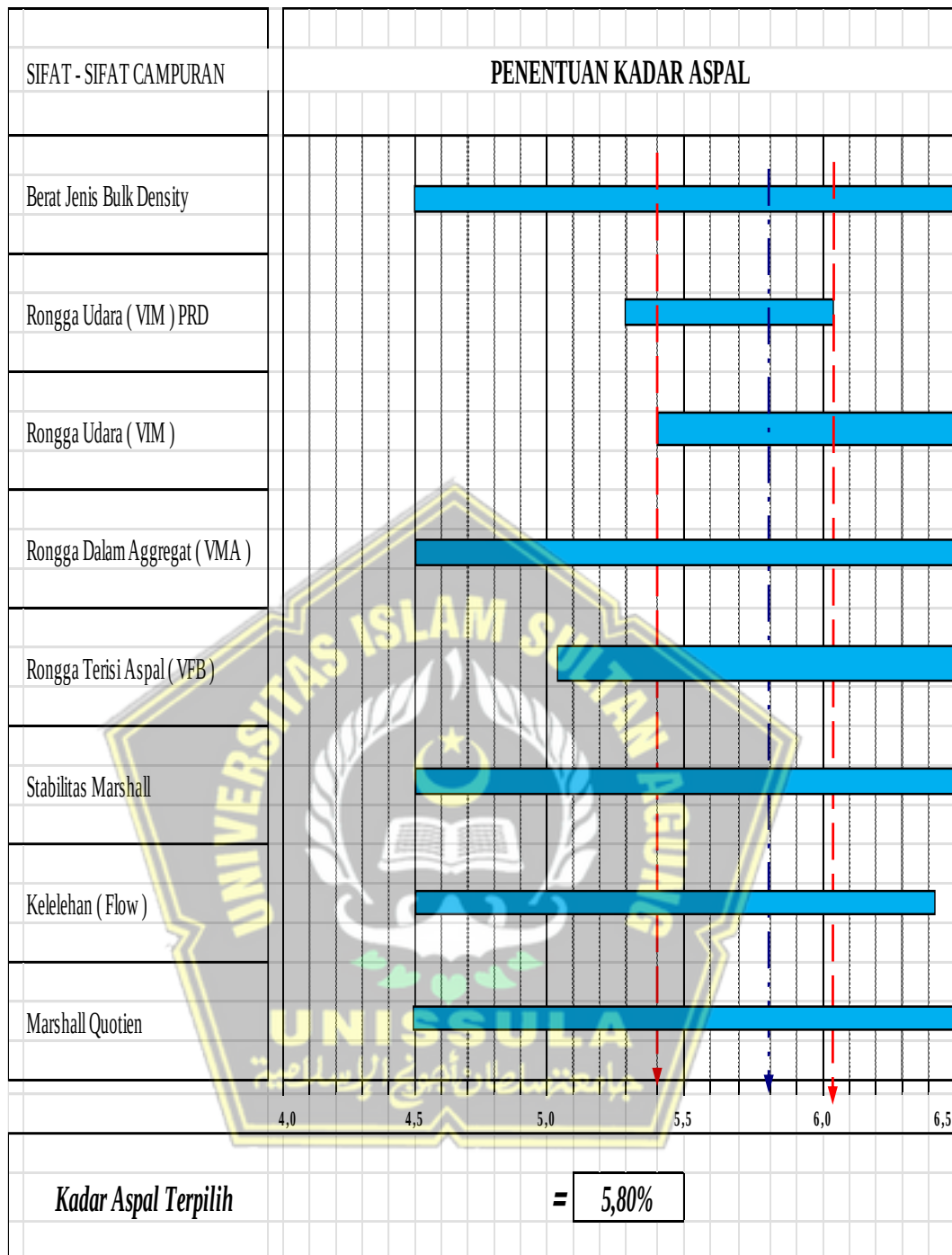
KARAKTERISTIK CAMPURAN	KADAR ASPAL (%)					PERSYARATAN
	4,5	5	5,5	6	6,5	
Stabilitas (kg)	979,1	1026,6	1063,1	1096,0	1004,7	Min.800
Flow (mm)	3,0	3,2	3,4	3,6	4,1	2-4
VIM (%)	7,29	6,20	4,77	3,85	3,89	3-5
VMA (%)	16,53	16,63	16,44	16,77	17,85	Min. 15
VFB (%)	55,9	62,7	71,0	77,0	78,2	Min. 65
Marshall Quotient (kg/mm)	330	317	312	304	247	Min. 250
Bulk	2,321	2,331	2,348	2,352	2,334	-

Tabel 4.17. VIM kepadatan membal (PRD)

KARAKTERISTIK CAMPURAN	KADAR ASPAL(%)			PERSYARATAN
	5,3	5,8	6,3	
VIM PRD	3,5	2,5	1,4	< 3%

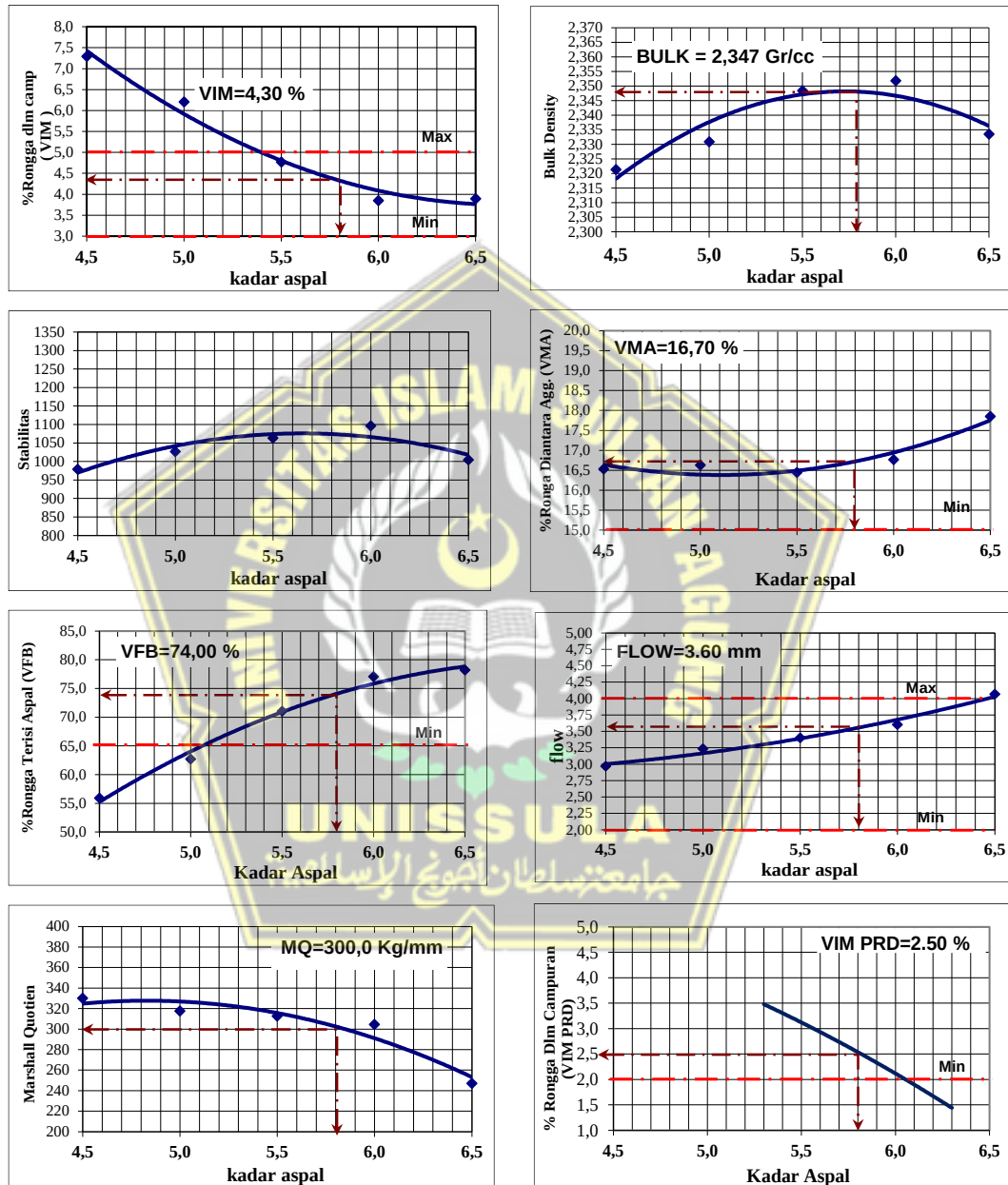
Dapat dinyatakan bahwa semua aspek campuran AC-WC yang diuji memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 berdasarkan data yang diperoleh dari karakteristik kombinasi dengan variasi kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6%. Nilai Stabilitas sudah melebihi minimal dari persyaratan yaitu 800 kg, untuk nilai flow sudah memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan yaitu 2-4 mm, untuk nilai VIM sudah memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan yaitu 3-5 %, untuk nilai VMA sudah memenuhi dari spesifikasi yang telah ditetapkan yaitu minimal 15%, untuk nilai *Marshall Quotient* juga sudah memenuhi aturan yang telah ditetapkan yaitu nilai terendah 250 kg/mm.

Angka-angka pada tabel sebelumnya dapat digunakan sebagai titik awal untuk menghitung persentase aspal yang ideal. Gambar 4.2 memberikan representasi diagram batang dari kadar aspal yang optimal.



Gambar 4.2. Hasil Penentuan Kadar Aspal Optimum

Evaluasi karakteristik Marshall menunjukkan bahwa komposisi aspal campuran berada dalam kisaran 4,5-6,5%. Kadar Aspal Optimal (KAO) dipilih sebagai titik tengah dari kisaran ini, yaitu 5,80%. Gambar 4.4 menampilkan resume data persentase aspal.



Gambar 4.3. Hasil Penentuan Kadar Aspal Optimum

Setelah menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO), langkah selanjutnya adalah membuat kembali sampel dengan menggunakan KAO tersebut. Kemudian, pengujian dilakukan untuk menentukan nilai karakteristik yang sesuai dengan Kadar Aspal Optimum (KAO), sebagaimana yang terdapat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Karakteristik campuran AC-WC pada kadar aspal optimum

Karakteristik Campuran	Kadar aspal optimum 5,8%	Persyaratan
Stabilitas (kg)	1078	Min. 800
Flow (mm)	3,70	2-4
Marshall Quotient (kg/mm)	291,3	Min 250
VIM (%)	4,73	3-5
VMA (%)	17,15	Min 15
VFB (%)	72,41	Min 65

4.5. Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum GMM

Tabel 4.19. Pemeriksaan berat jenis campuran maksimum GMM

No.	Normal			Pengujian Berat Jenis Campuran Aspal (GMM)									
	Contoh No :			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Berat Botol + Contoh		Gmm	2.202	2.203	2.309	2.311	2.565	2.550	2.678	2.592	2.575	2.545
2	Berat Botol		Gmm	648	616	648	648	648	648	648	648	648	648
3	Berat Contoh	(1 - 2)	Gmm	1.554	1.587	1.661	1.663	1.917	1.902	2.030	1.944	2.029	1.950
4	Berat Botol + Contoh + Air (batas kaliberasi)		Gmm	4.057	4.071	4.107	4.110	4.252	4.241	4.305	4.259	4.303	4.258
5	Berat botol + Air (batas kaliberasi)		Gmm	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125	3.125
6	Berat air	(4 - 5)	Gmm	932	946	982	985	1.127	1.116	1.180	1.134	1.178	1.133
7	Volume contoh	(3 - 6)	Gmm	622	641	679	678	790	786	850	810	851	817
8	Max Specific Gravity (Gmm)	(3 : 7)	Gmm / cc	2,498	2,476	2,446	2,453	2,427	2,420	2,388	2,400	2,384	2,387
9	Temperatur air °C		Gmm	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
10	Koreksi suhu		Gmm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	Max Specific Gravity (Gmm)	(8 x 10)	Gmm / cc	2,498	2,476	2,446	2,453	2,427	2,420	2,388	2,400	2,384	2,387
Rata - rata GMM				2,487		2,450		2,423		2,394		2,386	
Variasi Kadar Aspal %				4,50%		5,00%		5,50%		6,00%		6,50%	

Berat jenis campuran aspal dievaluasi pada lima tingkat kadar aspal yang berbeda 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6%. Batas maksimum berat jenis aspal yang dicapai adalah 2,487 gr/cc.

4.6. Ekstraksi

Tabel 4.20. Hasil Gradasi Ekstraksi

NO	URAIAN PEMERKSAAN		NO.1	NO.2	SAT
A	Berat Pan / Cawan		105,6	105,6	gram
B	Berat Material + Pan Sebelum		554,2	542,9	gram
C	Berat Material + Pan Sesudah		533,4	525,4	gram
D	Berat Sebelum Proses Ekstraksi	(B - A)	448,6	437,3	gram
E	Berat Setelah Proses Ekstraksi	(C - A)	427,8	419,8	gram
F	Berat dari Kertas Filter		6,5	6,6	gram
G	Total Berat Mineral	(C - A - F)	421,3	413,2	gram
H	Berat Aspal pada Campuran	(D - G)	27,3	24,1	gram
I	Persentase (%) Aspal Dalam Campuran	(H / D X 100)	6,09	5,51	%
Rata - rata			5,80		%

Hasil gradasi ekstraksi menunjukkan bahwa rata-rata dari semua uraian pemeriksaan adalah 5,80%.

4.7. Sifat Metode Marshall dari Campuran Aspal Panas

Tabel 4.21. Sifat Metode Marshall dari Campuran Aspal Panas

	Berat Jenis Aspal : 1,034					Gse : 2,665			Gsb : 2,656		Penyerapan (Abs) : 0,136						
no	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelahan	hasil bagi	luas	kadar	tebal
benda	aspal	di udara	dlm air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall	permukaan	aspal	lapis
uji							camp. Agg	agg.(vma)	camp(vim)	aspal(vib)	arloji	sesuaikan	(flow)	(mq)	agregat	efektif	aspal film
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
	% berat	data	data	data			100	100 -	100 -	100 -					lihat	b -	1000(b-a)
	total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	(100-b)+b	(100 - b)g	(100*a)	i				m / n	kombinasi	((Abs*(100-b)	pT(100-b)
	campuran						gse T	gsb	h						agregat	/100))	
	(%)	(g)	(g)	(g)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)	(m2 / kg)	(m2 / kg)	(mm)
1		1179,6	680,8	1184,9	504,1	2,340					100	1096	3,70				
2		1180,4	679,1	1185,1	506,0	2,333					97	1063	3,80				
3		1179,5	680,2	1185,3	505,1	2,335					98	1074	3,60				
rata - rata =	5,80					2,336	2,452	17,15	4,73	72,41		1078	3,70	291,3	5,57	5,67	10,13
4		1181,7	680,6	1186,7	506,1	2,335					92	1008	3,90				
5		1180,8	680,7	1186,2	505,5	2,336					90	986	3,80				
6		1181,1	680,8	1186,6	505,8	2,335					92	1008	3,90				
rata - rata =	5,80					2,335	2,452	17,17	4,76	72,29		1001	3,87	258,9	5,57	5,67	10,13
STABILITAS TERSISA SETELAH PERENDAMAN 24 JAM SUHU 60 ° C = (1001 : 1078) x100 = 92,88 %																	

Nilai Stabilitas Sisa setelah 24 jam perendaman pada suhu 60°C merupakan hasil pengujian Sifat Campuran Aspal Panas dengan Metode Marshall menggunakan kadar aspal optimum sebesar 5,8%. $(1001 : 1078) \times 100 = 92.88\%$

4.8. Gradasi Material Agregat

Tabel 4.22. Gradasi Material Agregat

UKURAN SARINGAN		KOMBINASI AGREGAT	SPESIFIKASI	
inch	mm		min	max
1"	25,4	100	100	100
¾"	19,1	100	100	100
½"	12,7	92,98	90	100
3/8"	9,5	77,95	77	90
#4	4,75	58,72	53	69
#8	2,38	41,81	33	53
#16	1,18	28,74	21	40
#30	0,60	19,62	14	30
#50	0,30	15,04	9	22
#100	0,15	9,29	6	15
#200	0,075	5,01	4	9

Dari hasil pengujian gradasi material agregat diperoleh kombinasi gradasi pada ekstraksi yaitu pada saringan No.200 sebanyak 5,01 %.

4.9. Hasil Pengujian Marshall

Setelah melakukan penentuan Job Mix Design dan Design Mix Formula, serta pembuatan 21 buah benda uji aspal, Langkah selanjutnya adalah menimbang seluruh benda uji yang digunakan dalam penelitian berada dalam keadaan kering. Setelah itu, dilakukan perendaman sampel uji selama satu hari penuh dalam air. dan ditimbang kembali dalam keadaan SSD (*Saturated Surface Dry*). Setelah massa benda ditentukan, benda tersebut akan dipanaskan hingga 60°C dalam *water bath* selama 30 menit sebelum ditimbang kembali. Sampel aspal direndam dalam *water bath*, dan kemudian nilai stabilitas dan alirannya diukur dengan menggunakan instrumen Marshall. Variabel seperti *Void in Mineral Aggregates* (VMA), *Void in Mix* (VIM), *Void in Bitumen* (VFB), Stabilitas, Flow, dan *Marshall Quotient* (MQ) diukur pada uji Marshall.

Hasil dari pengujian Marshall Test dicatat dalam tabel yang merekapitulasi semua nilai parameter tersebut. Selain itu, Parameter Marshall VMA, VIM, VFB, Stabilitas, Flow, dan MQ semuanya diuji dan ditemukan dalam rentang yang dapat diterima, seperti yang dirinci dalam grafik yang disediakan, di bawah Revisi 2 dari Spesifikasi Umum dari Bina Marga untuk 2018.

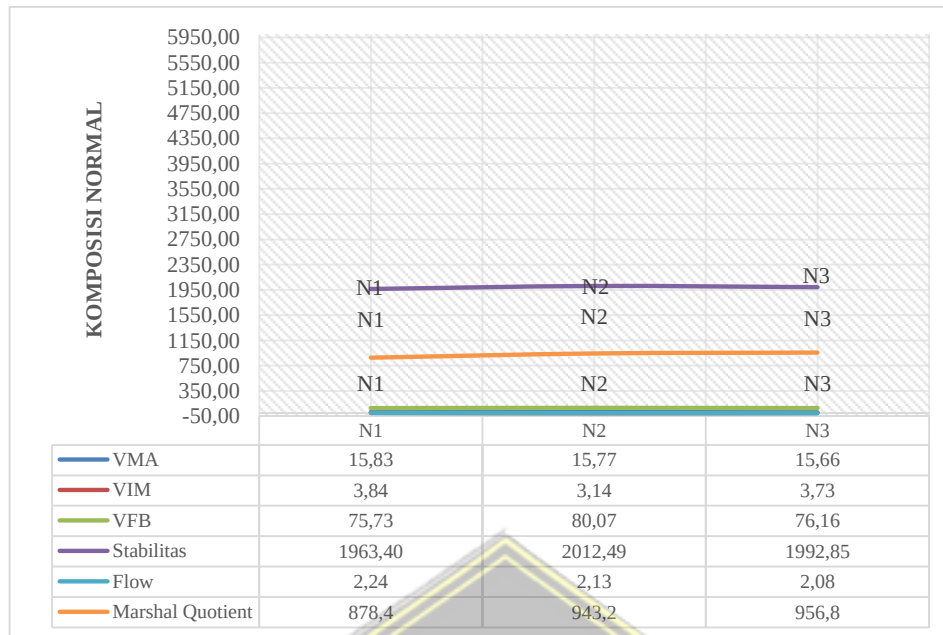
Pengujian *Marshall* dalam penelitian ini menghasilkan 7 komposisi berbeda, meliputi pengujian untuk benda uji komposisi normal, kombinasi *fly ash* 30% + *bottom ash* 30%, kombinasi *fly ash* 50% + *bottom ash* 50%, kombinasi abu batu + *bottom ash* 30%, kombinasi abu batu + *bottom ash* 50%, kombinasi pasir + *fly ash* 50% dan kombinasi pasir + *fly ash* 30%, dengan masing-masing terdiri dari 3 benda uji tiap komposisi.

4.9.1. Hasil Marshall Benda Uji Komposisi Normal

Tabel 4.23. Hasil Marshall Komposisi Normal

HASIL NORMAL															
BJ Aspal (T) :		1,034	BJ Efektif Total Agregat (Gse) : 2,665				BJ Total Agg (Gsb) : 2,656			Kalibrasi Proving Ring = 9,817 Kg					
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelahan	hasil bagi
benda	NORMAL	aspal	di udara	dlim air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall
uji								camp. Agg	agg (vma)	camp (vim)	aspal (vfb)	arloji	sesuaikan	(flow)	(mq)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100(i-j)				
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - b)g	(100*g)	i				m / n
		campuran							gsb	h					
		(%)	(g)	(g)	(g)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
N1	0%	5,8	1182,8	686,6	1185,0	498,4	2,373	2,468	15,83	3,84	75,73	200	1963,40	2,24	878,4
Rata-rata							2,373	2,468	15,83	3,84	75,73	200,00	1963,40	2,24	878,4
N2	0%	5,8	1178,2	684,2	1180,3	496,1	2,375	2,452	15,77	3,14	80,07	205	2012,49	2,13	943,2
Rata-rata							2,375	2,452	15,77	3,14	80,07	205,00	2012,49	2,13	943,2
N3	0%	5,8	1165,0	678,4	1175,8	497,4	2,342	2,433	15,66	3,73	76,16	203	1992,85	2,08	956,8
Rata-rata							2,342	2,433	15,66	3,73	76,16	203,00	1992,85	2,08	956,8

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi normal direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik yang dapat memberikan visualisasi yang jelas dan mudah dipahami mengenai nilai-nilai parameter Marshall, seperti VMA, VIM, VFB, Stabilitas, Flow, dan MQ, dan menunjukkan bahwa catatan tersebut memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (revisi 2). Grafik 4.4 ditampilkan di bawah ini.



Gambar 4.4. Grafik Hasil *Marshall* Komposisi Normal

Dari Grafik 4.4. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai. Untuk parameter VIM (*Void in Mix*) mengacu pada rongga dalam campuran. Nilai dari N1, N2, dan N3 telah sesuai dengan standar yang diuraikan dalam Spesifikasi Bina Marga, Edisi 2018. Untuk nilai N1 adalah 3,84%, untuk N2 adalah 3,14% dan untuk N3 adalah 3,73%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau ruang kosong di dalam agregat mineral, nilai yang diperoleh sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai N1 adalah 15,83%, untuk nilai N2 adalah 15,77%, dan untuk nilai N3 adalah 15,66%.

Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal, nilai yang diperoleh sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai N1 adalah 75,73%, untuk nilai N2 adalah 80,07% dan untuk nilai N3 adalah 76,16%.

Nilai Stabilitas menunjukkan hasil penelitian ini menunjukkan kualitas yang baik dan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Stabilitas memiliki nilai yang optimal dan fleksibel di antara semua parameter pada benda uji komposisi normal. Untuk nilai N1 adalah 1963,40 kg, untuk nilai N2 adalah 2012,49 kg dan untuk nilai N3 adalah 1992,85 kg.

Nilai Flow (kelelehan) sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai N1 adalah 2,24 mm, untuk nilai N2 adalah 2,13 mm dan untuk nilai N3 adalah 2,08 mm.

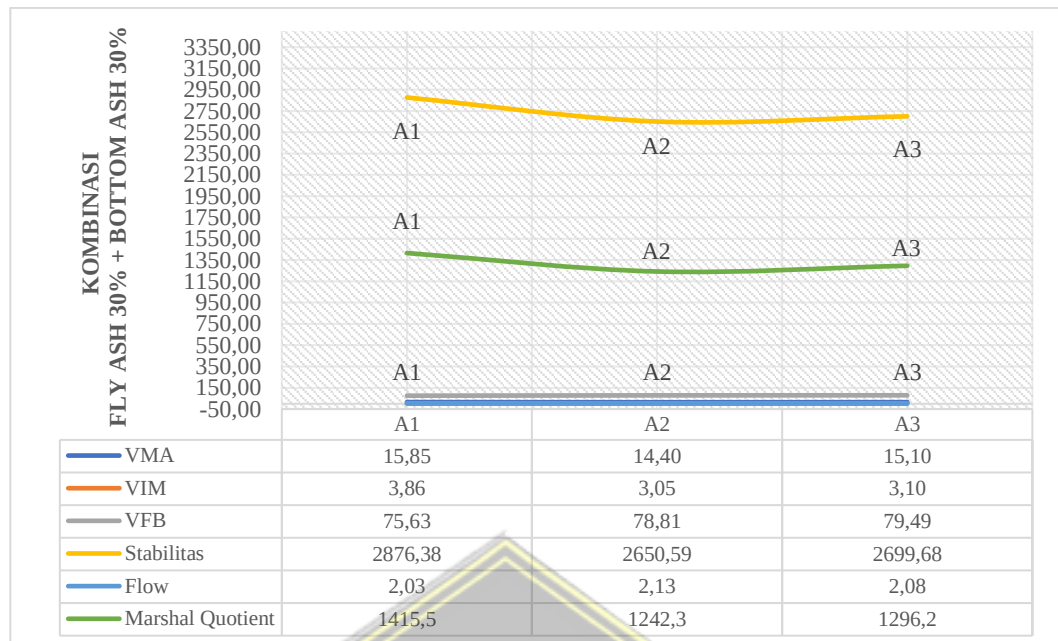
Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai N1 adalah 878,4 kg/mm, untuk nilai N2 adalah 943,2 kg/mm dan untuk nilai N3 adalah 956,8 kg/mm.

4.9.2. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 30%

Tabel 4.24. Hasil Marshall Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 30%

HASIL (Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 30%)															
BJ Aspal (T) :		1,034	BJ Efektif Total Agregat (Gse) : 2,665			BJ Total Agg (Gsb) : 2,656			Kalibrasi Proving Ring =			9,817 Kg			
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelehan	hasil bagi
benda	BA + FA	aspal	di udara	dlm air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall
uji							camp. Agg	camp. Agg	agg(vma)	camp(vim)	aspal(vib)	arioji	sesuaikan	(flow)	(mq)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100(i-j)				
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - h)g	(100-g)	i				m / n
		campuran							gsh	h					
		(%)	(gr)	(gr)	(gr)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
A1B	30% +30%	5,8	1170,2	678,2	1171,4	493,2	2,373	2,468	15,85	3,86	75,63	293	2876,38	2,03	1415,5
Rata-rata							2,341	2,468	15,85	3,86	75,63	151,33	2876,38	2,03	1415,5
A2B	30% +30%	5,8	1179,8	685,3	1181,6	496,3	2,377	2,452	14,40	3,05	78,81	270	2650,59	2,13	1242,3
Rata-rata							2,377	2,452	14,40	3,05	78,81	270,00	2650,59	2,13	1242,3
A3B	30% +30%	5,8	1170,8	680,0	1176,6	496,6	2,358	2,433	15,10	3,10	79,49	275	2699,68	2,08	1296,2
Rata-rata							2,358	2,433	15,10	3,10	79,49	275,00	2699,68	2,08	1296,2

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi kombinasi Fly ash 30% + Bottom ash 30% telah direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik. Grafik ini dapat ditemukan pada Grafik 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5. Grafik Hasil *Marshall* Kombinasi FA 30% + BA 30%

Dari Grafik 4.5. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai.. Untuk parameter VIM (*Void in Mix*) atau rongga di dalam campuran. Nilai A1, A2 dan A3 sudah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Untuk nilai A1 adalah 3,86%, untuk A2 adalah 3,05% dan untuk A3 adalah 3,10%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau rongga di antara mineral agregat, nilai yang diperoleh sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1 adalah 15,85%, untuk nilai A2 adalah 14,40%, dan untuk nilai A3 adalah 15,10%.

Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal, nilai yang diperoleh sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1 adalah 75,63%, untuk nilai A2 adalah 78,81% dan untuk nilai A3 adalah 79,49%.

Nilai stabilitas yang diperoleh memuaskan, seperti yang diharapkan. Terdapat nilai optimal dan fleksibel untuk stabilisasi di antara parameter lainnya dalam benda uji komposisi normal. Untuk nilai A1 adalah 2876,38 kg, untuk nilai A2 adalah 2650,59 kg dan untuk nilai A3 adalah 2699,68 kg.

Nilai Flow (kelelehan) sudah mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam persyaratan Bina Marga 2018. Untuk nilai A1 adalah 2,03 mm, untuk nilai A2 adalah 2,13 mm dan untuk nilai A3 adalah 2,08 mm.

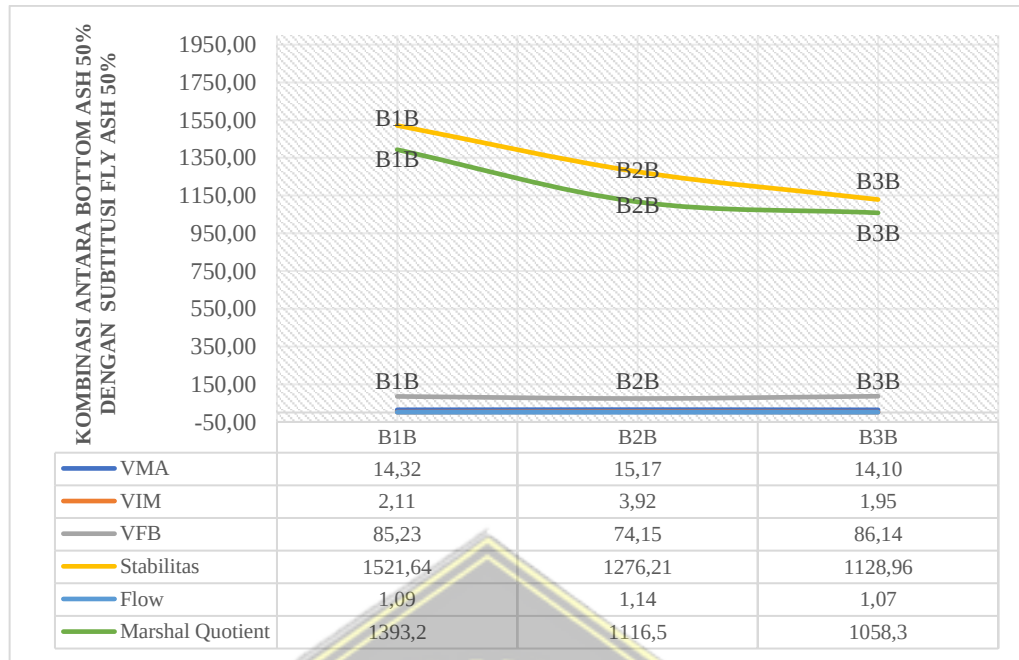
Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai A1 adalah 1415,5 kg/mm, untuk nilai A2 adalah 1242,3 kg/mm dan untuk nilai A3 adalah 1296,2 kg/mm.

4.9.3. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 50%

Tabel 4.25. Hasil Marshall Kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 50%

HASIL (Kombinasi Bottom Ash 50% + Fly Ash 50%)															
BJ Aspal (T) :		1,034	BJ Efektif Total Agregat (Gse) : 2,665			BJ Total Agg (Gsb) : 2,656			Kalibrasi Proving Ring = 9,817 Kg						
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelehan	hasil bagi
benda	FA + BA	aspal	di udara	dlm air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall
uji								camp. Agg	agg (vma)	camp (vim)	aspal (vfb)	arloji	sesuaikan	(flow)	(mq)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100 (i - j)				
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - b) g	(100 * e)	i				m / n
		campuran							gsb	h					
		(%)	(gr)	(gr)	(gr)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
B1B	50% +50%	5,8	1173,6	690,0	1175,8	485,8	2,416	2,468	14,32	2,11	85,23	155	1521,64	1,09	1393,2
Rata-rata							2,416	2,468	14,32	2,11	85,23	155,00	1521,64	1,09	1393,2
B2B	50% +50%	5,8	1177,0	680,4	1180,0	499,6	2,356	2,452	15,17	3,92	74,15	130	1276,21	1,14	1116,5
Rata-rata							2,356	2,452	15,17	3,92	74,15	130,00	1276,21	1,14	1116,5
B3B	50% +50%	5,8	1180,8	690,2	1185,2	495,0	2,385	2,433	14,10	1,95	86,14	115	1128,96	1,07	1058,3
Rata-rata							2,385	2,433	14,10	1,95	86,14	115,00	1128,96	1,07	1058,3

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi kombinasi Fly ash 50% + Bottom ash 50% direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik, yang dapat ditemukan pada Grafik 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.6. Grafik Hasil *Marshall* Kombinasi FA 50% + BA 50%

Dari Grafik 4.6. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai. Nilai B2 dan B3 memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 sedangkan B1 tidak. Kekosongan dalam agregat, juga dikenal sebagai parameter VIM (*Void In Mix*). Nilai untuk B1 adalah 2,11%, B2 adalah 3,92%, dan B3 adalah 1,95%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau rongga di antara mineral agregat, nilai B2 dan B3 sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi, sedangkan nilai B1 belum memenuhi spesifikasi. Untuk nilai B1 adalah 14,32%, untuk nilai B2 adalah 15,17%, dan untuk nilai B3 adalah 15,84%. Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal, nilai B1, B2 dan B3 sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai B1 adalah 85,23%, untuk nilai B2 adalah 74,15% dan untuk nilai B3 adalah 86,14%.

Nilai Stabilitas menunjukkan sudah memenuhi spesifikasi. Stabilitas memiliki nilai yang optimal dan fleksibel di antara semua parameter pada benda uji komposisi normal. Untuk nilai B1 adalah 1521,64 kg, untuk nilai B2 adalah 1276,21 kg dan untuk nilai B3 adalah 1128,96 kg.

Nilai Flow (kelelahan) masih termasuk rendah dibandingkan dengan nilai stabilitas dan belum mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai B1 adalah 1,09 mm, untuk nilai B2 adalah 1,14 mm dan untuk nilai B3 adalah 1,07 mm.

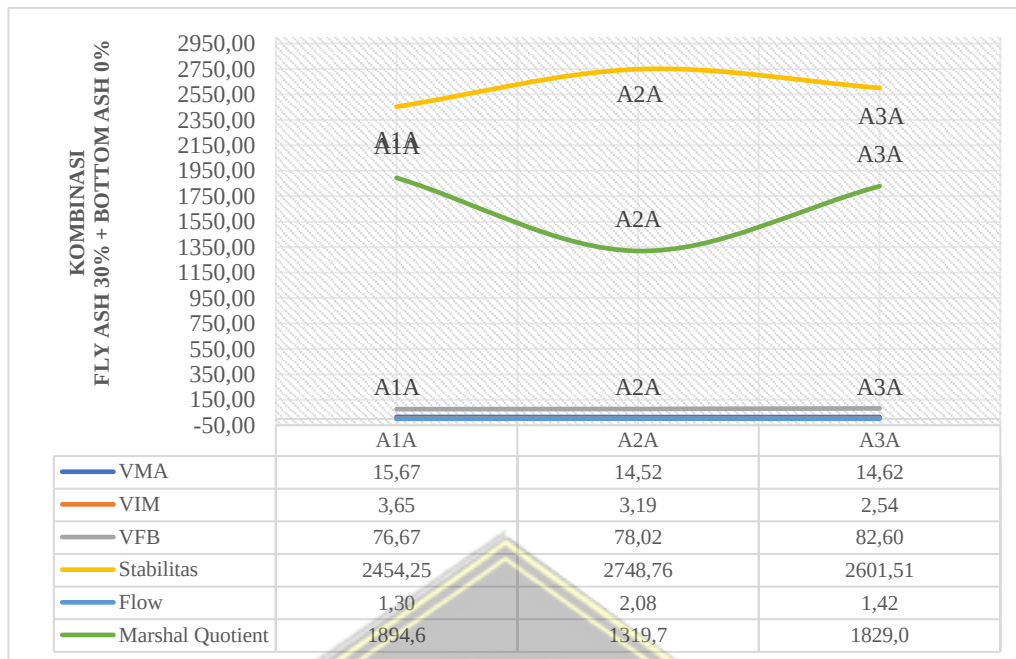
Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai B1 adalah 1393,2 kg/mm, untuk nilai B2 adalah 1116,5 kg/mm dan untuk nilai B3 adalah 1058,3 kg/mm.

4.9.4. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 0%

Tabel 4.26. Hasil Marshall Kombinasi Fly Ash 30% + Bottom Ash 0%

HASIL (Fly Ash 30% + Bottom Ash 0%)															
BJ Aspal (T) :		1,034		BJ Efektif Total Agregat (Gse) : 2,665				BJ Total Agg (Gsb) : 2,656				Kalibrasi Proving Ring = 9,817 Kg			
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelahan	hasil bagi
benda	BA	aspal	di udara	dim air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall
uji							camp. Agg	agg. (vma)	camp (vim)	aspal (vfb)	arloji	sesuaikan	(flow)	(mq)	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100 (i-i)				
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - b)g	(100 * g)	i				m / n
		campuran							gsh	h					
		(%)	(g)	(g)	(g)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
A1A	30% +0%	5,8	1178,2	681,2	1176,7	495,5	2,378	2,468	15,67	3,65	76,67	250	2454,25	1,30	1894,6
Rata-rata							2,378	2,468	15,67	3,65	76,67	250,00	2454,25	1,30	1894,6
A2A	30% +0%	5,8	1173,8	680,8	1175,3	494,5	2,374	2,452	14,52	3,19	78,02	280	2748,76	2,08	1319,7
Rata-rata							2,374	2,397	14,52	3,19	78,02	280,00	2748,76	2,08	1319,7
A3A	30% +0%	5,8	1171,8	680,0	1174,2	494,2	2,371	2,433	14,62	2,54	82,60	265	2601,51	1,42	1829,0
Rata-rata							2,371	2,433	14,62	2,54	82,60	265,00	2601,51	1,42	1829,0

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi kombinasi Pasir + Fly Ash 30% direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik, yang dapat ditemukan pada Grafik 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7. Grafik Hasil Marshall Kombinasi FA 30% + BA 0%

Dari Grafik 4.7. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai. Untuk parameter VIM (*Void in Mineral Aggregate*) atau rongga di dalam campuran, Nilai A1A, A2A dan A3A sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1 adalah 3,65%, untuk A2 adalah 3,19% dan untuk A3 adalah 2,54%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau rongga di antara mineral agregat, hanya nilai A1A yang diperoleh sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1A adalah 15,67%, untuk nilai A2A adalah 14,52%, dan untuk nilai A3A adalah 14,62%.

Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal. Untuk nilai A1A sudah memenuhi persyaratan standar spesifikasi Bina Marga 2018, sedangkan untuk nilai A2A dan A3A belum mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1A adalah 76,67%, untuk nilai A2A adalah 78,02% dan untuk nilai A3A adalah 82,60%.

Nilai Stabilitas menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Stabilitas memiliki nilai yang optimal dan fleksibel di antara semua parameter pada benda uji komposisi normal. Untuk nilai A1A adalah 2454,25 kg, untuk nilai A2A adalah 2748,76 kg dan untuk nilai A3A adalah 2601,51 kg.

Nilai Flow (kelelahan) A2A sudah mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi, sedangkan nilai A1A dan A3A belum memenuhi. Untuk nilai A1A adalah 1,30 mm, untuk nilai A2A adalah 2,08 mm dan untuk nilai A3A adalah 1,42 mm.

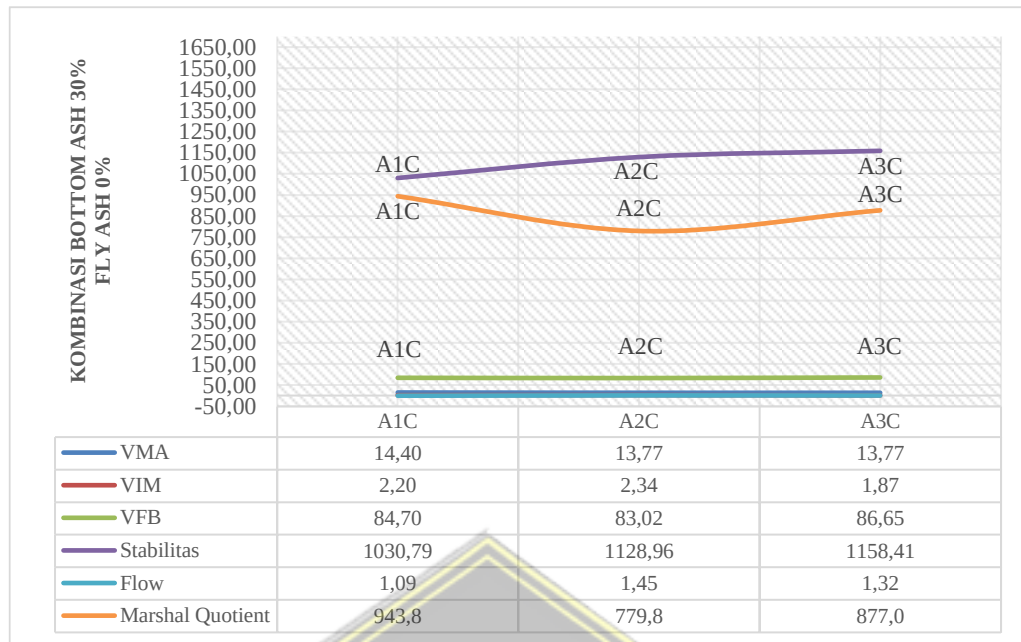
Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai A1A adalah 1894,6 kg/mm, untuk nilai A2A adalah 1319,7 kg/mm dan untuk nilai A3A adalah 1829,0 kg/mm.

4. 9.5. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Bottom Ash 30% + Fly Ash 0%

Tabel 4.27. Hasil Marshall Kombinasi Bottom Ash 30% + Fly Ash 0%

HASIL (Kombinasi Bottom Ash 30% + Fly Ash 0%)															
BJ Aspal (T) :		1,034				BJ Efektif Total Agregat (Gse) : 2,665				BJ Total Agg (Gsb) : 2,656				Kalibrasi Proving Ring = 9,817 Kg	
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelahan	hasil bagi
benda	BA	aspal	di udara	dim air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall
uji							camp. Agg	camp. Agg	agg (vma)	camp (vim)	aspal (vfb)	arloji	sesuaikan	(flow)	(mq)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100 (i-j)				
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - b)g	(100 * g)	i				m / n
		campuran							gsb	h					
		(%)	(g)	(g)	(g)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
A1C	30%	5,8	1123,8	660,4	1126,0	465,6	2,414	2,468	14,40	2,20	84,70	105	1030,79	1,09	943,8
Rata-rata							2,414	2,468	14,40	2,20	84,70	105,00	1030,79	1,09	943,8
A2C	30%	5,8	1163,8	681,2	1167,2	486,0	2,395	2,452	13,77	2,34	83,02	115	1128,96	1,45	779,8
Rata-rata							2,395	2,452	13,77	2,34	83,02	115,00	1128,96	1,45	779,8
A3C	30%	5,8	1168,4	680,6	1170,0	489,4	2,387	2,433	14,03	1,87	86,65	118	1158,41	1,32	877,0
Rata-rata							2,387	2,433	14,03	1,87	86,65	118,00	1158,41	1,32	877,0

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi kombinasi *Bottom Ash* 30% + *Fly Ash* 0% direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik, yang dapat ditemukan pada Grafik 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7. Grafik Hasil *Marshall Test* Kombinasi BA 30% + FA 0%

Dari Grafik 4.7. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai. Untuk parameter VIM (*Void in Mix*) atau rongga di dalam campuran belum memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Untuk nilai A1 adalah 2,20%, untuk A2 adalah 2,34% dan untuk A3 adalah 1,87%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau rongga di antara mineral agregat, nilai yang diperoleh belum mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1 adalah 14,40%, untuk nilai A2 adalah 13,77%, dan untuk nilai A3 adalah 14,03%.

Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi. Untuk nilai A1 adalah 84,70%, untuk nilai A2 adalah 83,02% dan untuk nilai A3 adalah 86,65%. Nilai Stabilitas menunjukkan hasil yang baik dan memenuhi spesifikasi. Stabilitas memiliki nilai yang optimal dan fleksibel di antara semua parameter pada benda uji komposisi normal. Untuk nilai A1 adalah 1390,52 kg, untuk nilai A2 adalah 1522,95 kg dan untuk nilai A3 adalah 1562,67 kg.

Nilai Flow (kelelehan) masih termasuk rendah dibandingkan dengan nilai stabilitas dan belum mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi.

Untuk nilai A1 adalah 1,09 mm, untuk nilai A2 adalah 1,45 mm dan untuk nilai A3 adalah 1,32 mm.

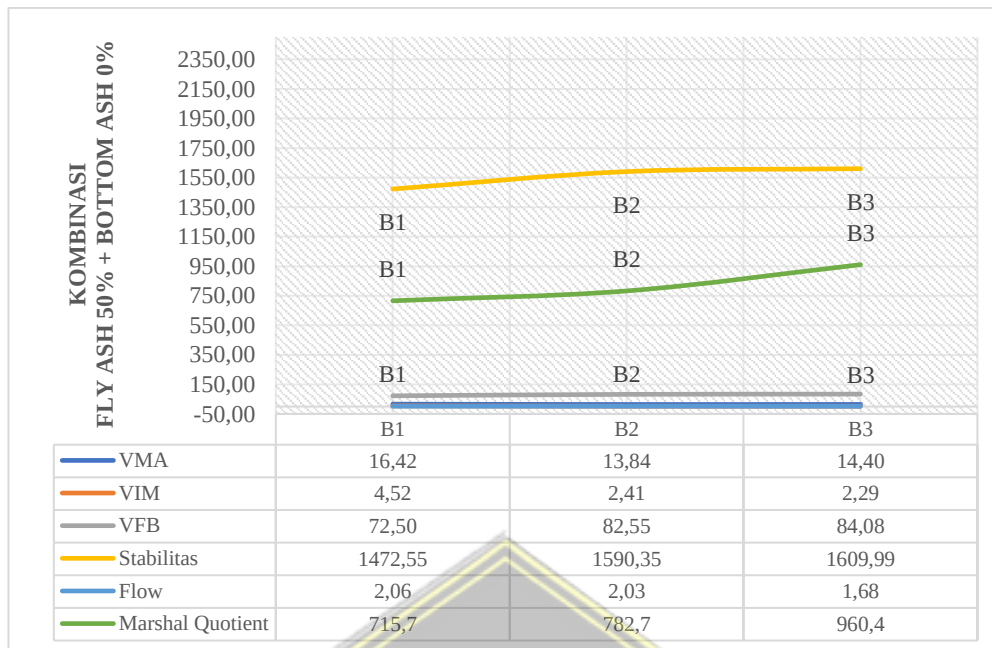
Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai A1 adalah 1273,1 kg/mm, untuk nilai A2 adalah 1051,9 kg/mm dan untuk nilai A3 adalah 1183,1 kg/mm.

4.9.6. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 0%

Tabel 4.28. Hasil Marshall Kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 0%

HASIL (Fly Ash 50% + Bottom Ash 0%)															
BJ Aspal (T) :		1,034	BJ Efektif Total Agregat (Gse) : 2,665				BJ Total Agg (Gsb) : 2,656			Kalibrasi Proving Ring = 9,817 Kg					
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelahan	hasil bagi
benda	FA	aspal	di udara	dlm air	ssd	isi	campuran	kombinasi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis	marshall
uji								camp. Agg	agg (vma)	camp (vim)	aspal (vfb)	arloji	sesuaikan	(flow)	(mq)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100(i-j)				
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - b)g	(100-a)	i				m / n
		campuran							gsb	h					
		(%)	(gr)	(gr)	(gr)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm)	(kg/mm)
B1A	50%	5,8	1191,0	691,0	1196,4	505,4	2,357	2,468	16,42	4,52	72,50	150	1472,55	2,06	715,7
Rata-rata							2,357	2,468	16,42	4,52	72,50	150,00	1472,55	2,06	715,7
B2A	50%	5,8	1169,6	700,2	1189,0	488,8	2,393	2,452	13,84	2,41	82,55	162	1590,35	2,03	782,7
Rata-rata							2,393	2,452	13,84	2,41	82,55	162,00	1590,35	2,03	782,7
B3A	50%	5,8	1181,0	685,4	1182,2	496,8	2,377	2,433	14,40	2,29	84,08	164	1609,99	1,68	960,4
Rata-rata							2,377	2,433	14,40	2,29	84,08	164,00	1609,99	1,68	960,4

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi kombinasi Fly Ash 50% + Bottom Ash 0% direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik, yang dapat ditemukan pada Grafik 4.8 di bawah ini.



Gambar 4.8. Grafik Hasil *Marshall* Kombinasi FA 50%+BA 0%

Dari Grafik 4.8. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai. Untuk parameter VIM (*Void in Mix*) atau rongga di dalam campuran. Nilai B2 dan B3 belum memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, hanya Nilai B1 yang memenuhi. Untuk nilai B1 adalah 4,52%, untuk B2 adalah 2,41% dan untuk B3 adalah 2,29%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau rongga di antara mineral agregat, nilai B2 dan B3 yang diperoleh belum mencapai nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi, sedangkan nilai B1 sudah memenuhi. Untuk nilai B1 adalah 16,42%, untuk nilai B2 adalah 13,84%, dan untuk nilai B3 adalah 14,40%.

Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal. Semua nilai VFB sudah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Untuk nilai B1 adalah 72,50%, untuk nilai B2 adalah 82,55% dan untuk nilai B3 adalah 84,08%.

Nilai Stabilitas menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Stabilitas memiliki nilai yang optimal dan fleksibel di antara semua parameter pada benda uji komposisi *Fly Ash* 50% +Bottom Ash 0%. Untuk nilai B1 adalah 1472,55 kg, untuk nilai B2 adalah 1590,35 kg dan untuk nilai B3 adalah 1609,99 kg.

Nilai Flow (kelelehan) pada nilai B1 dan B2 sudah memenuhi spesifikasi kecuali nilai B3 masih termasuk rendah. Untuk nilai B1 adalah 2,06 mm, untuk nilai B2 adalah 2,03 mm dan untuk nilai B3 adalah 1,68 mm.

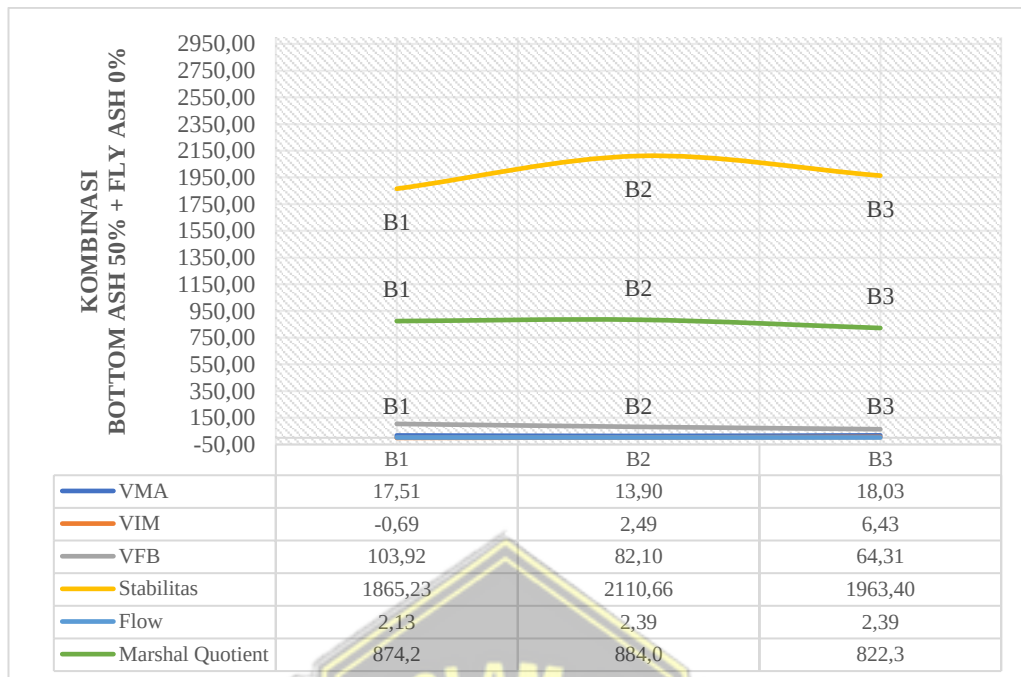
Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai B1 adalah 715,7 kg/mm, untuk nilai B2 adalah 782,7 kg/mm dan untuk nilai B3 adalah 960,4 kg/mm.

4.9.7. Hasil Marshall Benda Uji Kombinasi Bottom Ash 50% + Fly Ash 0%

Tabel 4.29. Hasil Marshall Kombinasi Bottom Ash 50% + Fly Ash 0%

HASIL (Kombinasi Bottom Ash 50% + Fly Ash 0%)														
BJ Aspal (T) :		1,034		BJ Efektif Total Agregat (Gse) :			2,665		BJ Total Agg (Gsb) :			2,656		Kalibrasi Proving Ring = 9,817 Kg
no	%	kadar	berat	berat	berat	volume/	bj. Bulk	bj. Maks	% rongga	% rongga	% rongga	stabilitas		kelelehan
benda	FA + BA	aspal	di udara	dlm air	ssd	isi	campuran	komposisi	diantara	dalam	terisi	dibaca	di	plastis
uji								camp. Agg	agg (vma)	camp (vim)	aspal (vfb)	arloji	sesuaikan	(flow)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n
		% berat	data	data	data				100 -	100 -	100 (i - j)			
		total	timbang	timbang	timbang	e - d	c / f	GMM	(100 - b)g	(100 * e)	i			m / n
		campuran						gsb	h					
		(%)	(gr)	(gr)	(gr)				(%)	(%)	(%)	(strip)	(kg)	(mm) (kg/mm)
B1C	0% +50%	5,8	1171,3	687,2	1190,8	503,6	2,326	2,310	17,51	-0,69	103,92	190	1865,23	2,13 874,2
Rata-rata							2,326	2,310	17,51	-0,69	103,92	190,00	1865,23	2,13 874,2
B2C	0% +50%	5,8	1186,4	693,0	1189,2	496,2	2,391	2,452	13,90	2,49	82,10	215	2110,66	2,39 884,0
Rata-rata							2,391	2,452	13,90	2,49	82,10	215,00	2110,66	2,39 884,0
B3C	0% +50%	5,8	1207,0	678,2	1208,4	530,2	2,276	2,433	18,03	6,43	64,31	200	1963,40	2,39 822,3
Rata-rata							2,276	2,433	18,03	6,43	64,31	200,00	1963,40	2,39 822,3

Setelah semua data pengujian Marshall pada benda uji dengan komposisi kombinasi Bottom Ash 50% + Fly Ash 0% direkap dalam tabel, langkah selanjutnya adalah menggambarkan data tersebut dalam bentuk grafik, yang dapat ditemukan pada Grafik 4.9 di bawah ini.



Gambar 4.9. Grafik Hasil *Marshall* Kombinasi Bottom Ash 50% + *Fly Ash* 0%

Dari Grafik 4.9. dapat dilihat bahwa hasil parameter *Marshall Test* menghasilkan variasi nilai. Untuk parameter VIM (*Void in Mix*) atau rongga di dalam campuran. Nilai B1 dan B2 belum mencapai persyaratan sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, sedangkan nilai B1 yang melebihi spesifikasi. Untuk nilai B1 adalah -0,69%, untuk B2 adalah 2,49% dan untuk B3 adalah 6,43%.

Nilai VMA (*Void in the Mineral Aggregate*) atau rongga di antara mineral agregat, nilai B1 dan B2 yang diperoleh sudah memenuhi nilai minimal yang ditetapkan dalam spesifikasi kecuali nilai B2, sedangkan nilai Untuk nilai B1 adalah 17,51%, untuk nilai B2 adalah 13,90%, dan untuk nilai B3 adalah 18,03%.

Nilai VFB (*Void Filled Bitumen*) atau rongga dalam benda uji yang terisi aspal. Nilai B1 dan B2 sudah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 kecuali nilai B3. Untuk nilai B1 adalah 103,92%, untuk nilai B2 adalah 82,10% dan untuk nilai B3 adalah 64,31%.

Nilai Stabilitas menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Stabilitas memiliki nilai yang optimal dan fleksibel di antara semua parameter pada benda uji komposisi Bottom Ash 50% + *Fly Ash* 0%. Untuk nilai B1 adalah 1865,23 kg, untuk nilai B2 adalah 2110,66 kg dan untuk nilai B3 adalah 1953,40 kg.

Nilai *Flow* (kelelehan) sudah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Untuk nilai B1 adalah 2,13 mm, untuk nilai B2 adalah 2,39 mm dan untuk nilai B3 adalah 2,39 mm.

Nilai MQ (*Marshall Quotient*) menunjukkan hasil memenuhi spesifikasi. Nilai MQ cenderung meningkat pada setiap sampel yang diuji. Untuk nilai B1 adalah 874,2 kg/mm, untuk nilai B2 adalah 884,0 kg/mm dan untuk nilai B3 adalah 822,3 kg/mm.

4.10. Hasil Rekapitulasi

Rekapitulasi hasil pengujian Marshall terhadap campuran aspal beton lapis aus menggunakan substitusi *bottom ash* serta *fly ash*. Data hasil rekapitulasi diambil dari rata-rata 3 sampel yang diuji dari satu benda uji. Informasi lebih lanjut dapat ditemukan pada Tabel 4.30. Uraian semua benda uji berserta dengan nilai berbagai parameter.

Tabel 4.30. Hasil Rekapitulasi diambil rata-rata

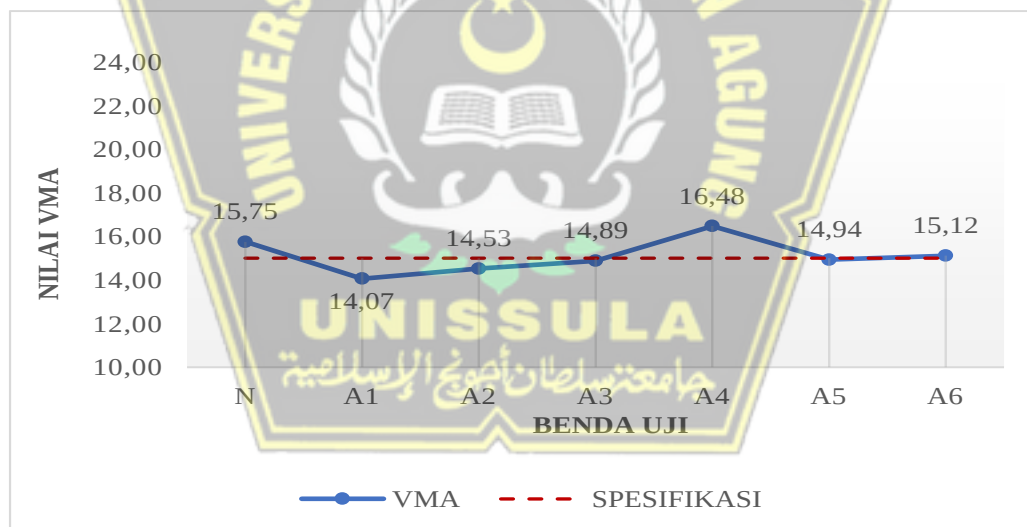
KODE	BENDA UJI	VMA	VIM	VFB	STABILITAS	FLOW	MQ
N	NORMAL	15,75	3,57	77,32	1989,58	2,15	926,15
A1	AB+BA 30%	14,07	2,14	84,79	1106,05	1,29	866,86
A2	BA 50%+FA 50%	14,53	2,66	81,84	1308,93	1,10	1189,33
A3	PS+FA 50%	14,89	3,07	79,71	1557,63	1,92	819,59
A4	AB+BA 50%	16,48	2,75	83,44	1979,76	2,30	860,19
A5	PS+FA 30%	14,94	3,13	79,10	2601,51	1,60	1681,10
A6	FA 30%+BA 30%	15,12	3,34	77,98	2742,22	2,08	860,19
	RATA-RATA	15,11	3,00	80,60	1897,95	2,00	1029,06
	SPESIFIKASI	> 15%	3-5%	> 65%	> 800 kg	2-4 mm	Min. 250

Data dalam tabel mewakili hasil pengujian yang dilakukan pada karakteristik yang tercantum, dapat disimpulkan bahwa persentase dari semua benda uji yang telah diambil rata-rata dari 3 sampel nilai VMA tertinggi sebesar 16,48%, sedangkan persentase nilai terendah sebesar 14,07%. Untuk nilai VIM tertinggi, persentase benda uji Normal memiliki nilai 3,57%, sedangkan nilai terendahnya sebesar 2,14%. Untuk nilai VFB persentase tertinggi sebesar 84,79% dan persentase

terendah sebesar 77,32%. Pada stabilitas memiliki persentase tertinggi sebesar 2742,22 kg dan persentase terendah sebesar 1308,93 kg. untuk nilai flow memiliki persentase tertinggi sebesar 2,30 mm dan persentase terendah sebesar 1,10 mm. Dan untuk nilai Marshall Quotient memiliki persentase tertinggi sebesar 1681,10 kg/mm dan persentase terendah sebesar 819,59 kg/mm.

Tabel 4.31. Nilai Rekapitulasi VMA

KODE	BENDA UJI	NILAI VMA
N	NORMAL	15,75
A1	AB + BA 30%	14,07
A2	BA 50% + FA 50%	14,53
A3	PS + FA 50%	14,89
A4	AB + BA 50%	16,48
A5	PS + FA 30%	14,94
A6	FA 30% + BA 30%	15,12
	SPESIFIKASI	>15 %

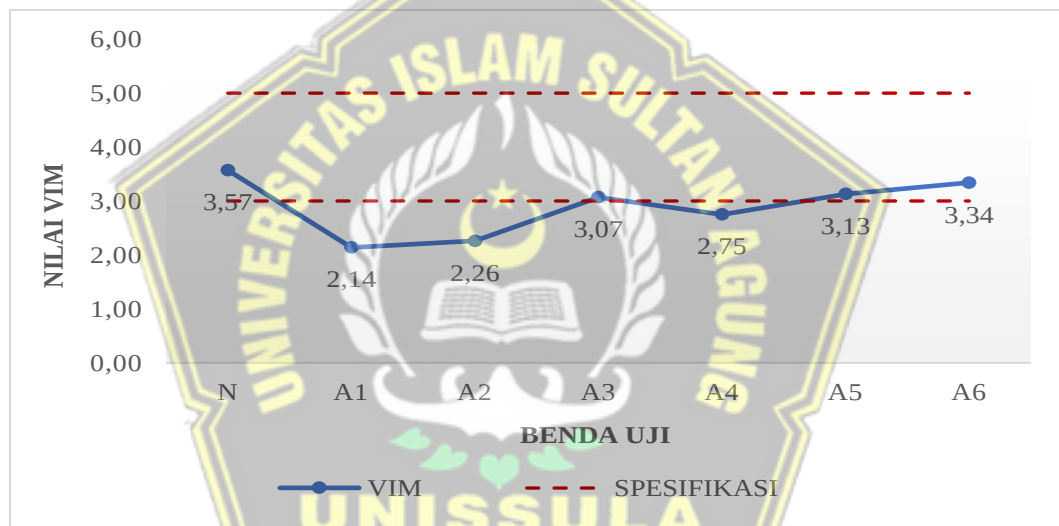


Gambar 4.10. Grafik Nilai VMA

Pada nilai VMA dari semua benda uji menunjukkan bahwa nilai VMA tertinggi ditemukan pada benda uji Abu batu + Bottom Ash 50% dengan nilai 16,48 % dan sudah memenuhi persyaratan umum Bina Marga Divisi 6 mengenai Perkerasan Aspal mensyaratkan bahwa nilai VMA harus lebih dari 15%. Rata-rata nilai VIM dari semua benda uji adalah 15,11%.

Tabel 4.32. Nilai Rekapitulasi VIM

KODE	BENDA UJI	NILAI VIM
N	NORMAL	3,57
A1	AB + BA 30%	2,14
A2	BA 50% + FA 50%	2,66
A3	PS + FA 50%	3,07
A4	AB + BA 50%	2,75
A5	PS + FA 30%	3,13
A6	FA 30% + BA 30%	3,34
	SPESIFIKASI	3-5%

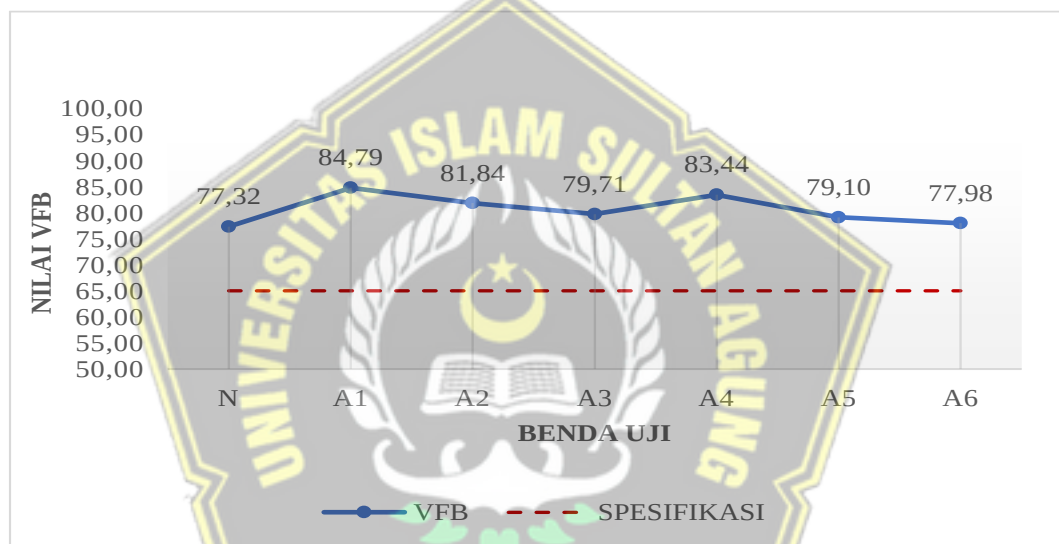


Gambar 4.11. Grafik Nilai VIM

Semua benda uji menunjukkan nilai VIM, dan nilai tertinggi ditemukan pada benda uji normal dengan nilai 3,57%, yang telah sesuai dengan spesifikasi umum Bina Marga Divisi 6 tentang Perkerasan Aspal yaitu 3-5%. Rata-rata nilai VIM dari semua benda uji adalah 3%.

Tabel 4.33. Nilai Rekapitulasi VFB

KODE	BENDA UJI	NILAI VFB
N	NORMAL	77,32
A1	AB + BA 30%	84,79
A2	BA 50% + FA 50%	81,84
A3	PS + FA 50%	79,71
A4	AB + BA 50%	83,44
A5	PS + FA 30%	79,10
A6	FA 30% + BA 30%	77,98
	SPESIFIKASI	>65 %

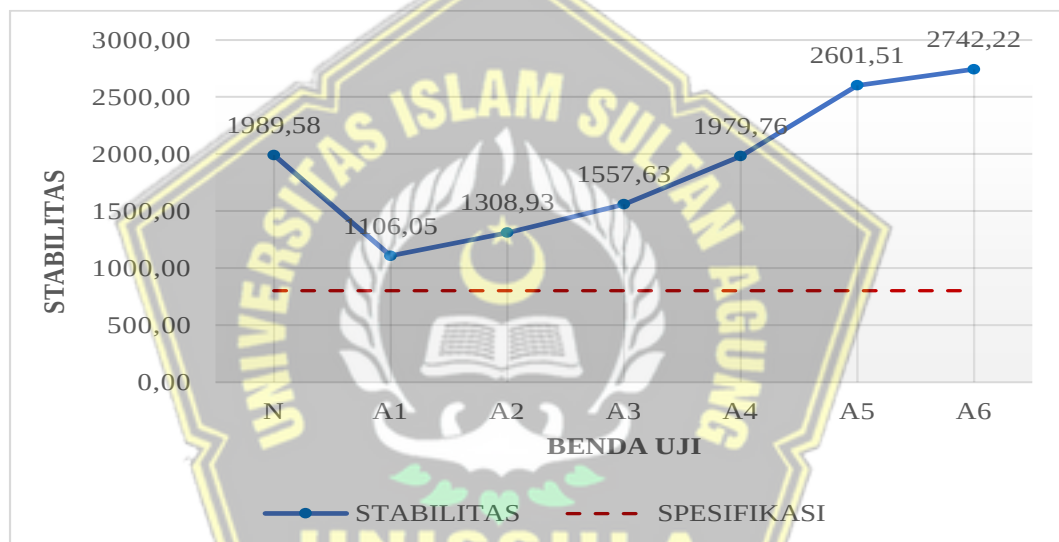


Gambar 4.12. Grafik Nilai VFB

Pada nilai VFB dari semua benda uji menunjukkan bahwa nilai VFB tertinggi ditemukan pada benda uji Abu batu + Bottom ash 30% dengan nilai 84,79% dan sudah memenuhi persyaratan umum Bina Marga Divisi 6 mengenai Perkerasan Aspal yaitu lebih dari 65%. Rata-rata nilai VFB dari semua benda uji adalah 80,60%.

Tabel 4.34. Nilai Rekapitulasi Stabilitas

KODE	BENDA UJI	NILAI STABILITAS
N	NORMAL	1989,58
A1	AB + BA 30%	1106,05
A2	BA 50% + FA 50%	1308,93
A3	PS + FA 50%	1557,63
A4	AB + BA 50%	1979,76
A5	PS + FA 30%	2601,51
A6	FA 30% + BA 30%	2742,22
	SPESIFIKASI	>800 kg

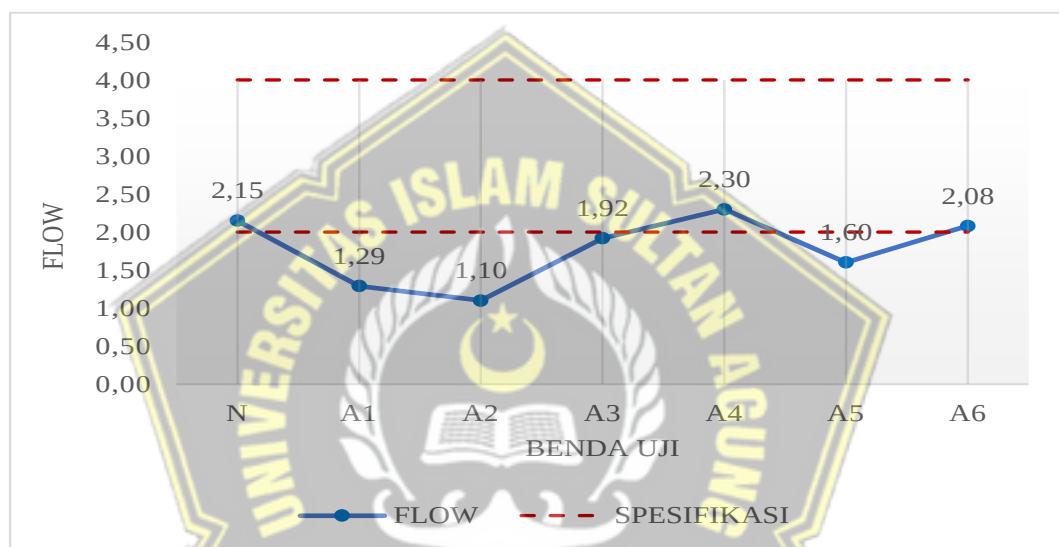


Gambar 4.13. Grafik Stabilitas

Semua benda uji menunjukkan nilai stabilitas, dan nilai tertinggi ditemukan pada benda uji dengan komposisi *Fly Ash* 30% + *Bottom ash* 30% dengan nilai 2742,22 kg, yang telah memenuhi spesifikasi umum Bina Marga Divisi 6 tentang Perkerasan Aspal yaitu lebih dari lebih dari 800 kg. Rata-rata nilai stabilitas dari semua benda uji adalah 1897,95 kg.

Tabel 4.35. Nilai Rekapitulasi Flow

KODE	BENDA UJI	NILAI FLOW
N	NORMAL	2,15
A1	AB + BA 30%	1,29
A2	BA 50% + FA 50%	1,10
A3	PS + FA 50%	1,92
A4	AB + BA 50%	2,30
A5	PS + FA 30%	1,60
A6	FA 30% + BA 30%	2,08
	SPESIFIKASI	2-4 mm

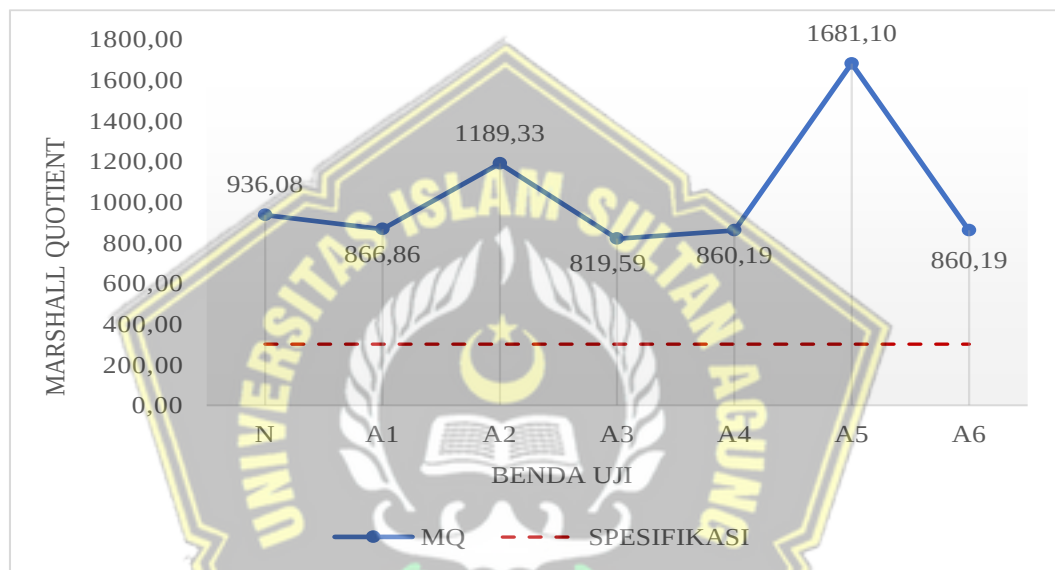


Gambar 4.14. Grafik Nilai Flow

Pada nilai flow dari semua benda uji menunjukkan bahwa nilai flow tertinggi ditemukan pada benda uji Abu batu + Bottom ash 50% dengan nilai 2,30 mm dan sudah memenuhi persyaratan umum Bina Marga Divisi 6 mengenai Perkerasan Aspal yaitu lebih dari lebih dari 2-4 mm. Rata-rata nilai flow dari semua benda uji adalah 2 mm.

Tabel 4.36. Nilai Rekapitulasi *Marshall Quotient*

KODE	BENDA UJI	NILAI MQ
N	NORMAL	926,15
A1	AB + BA 30%	866,86
A2	BA 50% + FA 50%	1189,33
A3	PS + FA 50%	819,59
A4	AB + BA 50%	860,19
A5	PS + FA 30%	1681,10
A6	FA 30% + BA 30%	860,19
	SPESIFIKASI	Min.250 kg/mm



Gambar 4.15. Grafik Marshall Quotient

Pada nilai Marshall Quotient dari semua benda uji menunjukkan bahwa nilai Marshall Quotient tertinggi ditemukan pada benda uji pasir + *fly ash* 30% dengan nilai 1681,10 kg/mm dan sudah memenuhi persyaratan umum Bina Marga Divisi 6 mengenai Perkerasan Aspal yaitu minimal 250 kg/mm. Rata-rata nilai Marshall Quotient dari semua benda uji adalah 1029,06 kg/mm.

Hasil analisis pengujian sebelumnya menunjukkan bahwa:

- a. Dengan melakukan uji stabilitas dengan nilai stabilitas minimum 800 kg dan kadar aspal optimal 5,8%, kami menemukan bahwa lapisan aspal memenuhi kriteria pedoman Bina Marga 2018. Tidak adanya deformasi yang cukup besar, seperti gelombang, alur, atau *bleeding*, mengindikasikan bahwa lapisan aspal memiliki stabilitas yang cukup untuk menangani tekanan lalu lintas. Hasilnya, perkerasan aspal secara umum diterima memiliki kualitas yang diperlukan untuk keselamatan dan kenyamanan pengguna. Tingkat stabilitas tersebut sesuai dengan persyaratan jalan yang melayani lalu lintas berat, seperti truk.
- b. Hasil uji kelelahan atau *flow* untuk lapisan aspal beton AC-WC yang menggunakan *bottom ash* dan *fly ash* masih dalam spesifikasi. Nilai akhir dari *flow* adalah 2 mm.
- c. Standar spesifikasi Bina Marga 2018 untuk lapisan aspal yang terbuat dari beton AC-WC dengan campuran *bottom ash* dan *fly ash* mensyaratkan nilai VMA minimum 14%, dan nilai ini tercapai. Dapat disimpulkan bahwa campuran lapis aspal beton masih memenuhi persyaratan VMA yang ditentukan oleh standar spesifikasi Bina Marga 2018, meskipun memiliki lebih sedikit celah udara di antara butiran agregat karena ukuran gradasi yang lebih padat.
- d. Standar spesifikasi Bina Marga 2018 mensyaratkan VIM (*Voids in Mix*) antara 3% sampai 5%, hasil pengujian VIM untuk lapisan aspal beton AC-WC dengan penambahan *bottom ash* dan *fly ash* memenuhi persyaratan tersebut. Karena campuran tersebut sangat dekat dengan batas minimum, maka dapat disimpulkan bahwa hanya terdapat sedikit pori-pori udara di antara agregat dan butiran aspal. Hal ini disebabkan karena campuran AC-WC memiliki ukuran butiran yang lebih halus. Namun demikian, pedoman spesifikasi Bina Marga 2018 untuk nilai VIM terpenuhi oleh campuran ini.
- e. *Marshall Quotient* (MQ) adalah ukuran seberapa baik satu lapisan aspal beton di atas AC-WC mengalir dibandingkan dengan lapisan lainnya. Batas minimum yang dapat diterima ditetapkan sebesar 300 kg/mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lapisan beton aspal AC-WC yang dimodifikasi dengan *bottom ash* dan *fly ash* memenuhi persyaratan standar Bina Marga 2018.

Temuan ini menunjukkan bahwa campuran tersebut cukup fleksibel dan stabil untuk mendukung beban kendaraan di atas permukaan perkerasan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berikut ini adalah hasil penelitian yang berjudul "Analisis Pengaruh *Bottom Ash* dan *Fly Ash* sebagai Bahan Substitusi pada *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC)" :

1. Nilai stabilitas tertinggi yang didapat pada penelitian ini yaitu pada benda uji dengan penambahan *Bottom ash* 30% dan *fly ash* 30% sebesar 2742,22 kg. Hasil ini menegaskan bahwa nilai stabilitas yang tercapai memenuhi standar Bina Marga 2018 yang mengatur sifat-sifat campuran lapis aspal beton *Asphalt Concrete-Wearing Coarse* (AC-WC), yaitu sebesar 800 kg.
2. Nilai *flow* terbaik diperoleh dari benda uji abu batu dan 50% *bottom ash*. sebesar 2,30 mm. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *flow* (2-4 mm) memenuhi persyaratan kualitas campuran Laston AC-WC seperti yang ditentukan dalam standar Bina Marga 2018.
3. Rancangan campuran (*Job Mix Design*) terbaik adalah menggunakan campuran meliputi komposisi kombinasi (FA 30% dan BA 30%).

5.2. Saran

Untuk menjalankan penelitian ini dengan lancar dan mencapai tujuan yang diinginkan, serta memberikan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya, eberapa hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut :

1. Teliti dan analisis sifat fisik dan kimia dari *fly ash* dan *bottom ash* yang akan digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran aspal.
2. Penelitian ini telah difokuskan pada campuran aspal beton AC-WC secara khusus. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan penelitian tambahan yang melibatkan jenis campuran *hot-mix* lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggarwal, P., Anggarwal, Y., Gupta, S.M. . (2007). *Effect Of Bottom Ash As Replacement Of Fine.*
- Arifudin, M. Y. (2020). *Pengaruh Penggunaan Bottom Ash pada Campuran Aspal Beton AC-WC Pen 60/70 Terhadap Parameter Marshall.*
- Ash, Coal Bottom. (2000). Boiler Slag-Material Description. *Recycled materials resource center.*
- Hisyam, M. F. (2010). *The Properties of Special Concrete Using Washed Bottom Ash (WBA) as Partial Sand Replacement.*
- Jaya, R. P., Hainin, M. R., Masri, K. A., Duraisamy, Y., & Shaffie, E. (2019). *Performance of Charcoal Coconut Shell Ash in the Asphalt Mixture under Long Term Aging.*
- Jenderal & Marga. (2018). *Spesifikasi Bina Marga 2018 Divisi 6.*
- Munir. (2010). *Penggunaan Bahan Pengisi Abu Terbang Dalam Industri Karet.*
- Roy dan Santoso. (2003). *Pengaruh Penggunaan Bottom Ash terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton.*
- Setyawan. R., W. T. (2007). Durabilitas beton fly ash yang diaktivasi dengan larutan alkali.
- Sukirman, S. (2003). *Perkerasan jalan raya.* Bandung: NOVA.
- Tahir, Wulan. (2015). *Pengaruh Variasi Bottom Ash Dan Abu Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Lapis Aus (Ac-Wc).*
- Wardani, S. P. (2008). *Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) Untuk Stabilitas Tanah Maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya Dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan.*
- Zulfhazli, W. d. (2016). *Penggunaan Abu Batu Bara Sebagai Filler pada campuran Aspal Beton AC-BC.*