

**PENGUNAAN *FLY ASH* SEBAGAI *FILLER* TERHADAP MODULUS
RESILIEN BETON ASPAL LAPIS AUS (AC-WC)**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
MINAT REKAYASA TRANSPORTASI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Magister Teknik



M.SADILLAH

NIM. 156060100111029

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**



TESIS
PENGUNAAN *FLY ASH* SEBAGAI *FILLER* TERHADAP MODULUS RESILIEN
BETON ASPAL LAPIS AUS (*AC-WC*)

M.SADILLAH
NIM.156060100111029

telah dipertahankan di depan penguji
pada tanggal 15 Januari 2018
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Komisi Pembimbing,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. M Zainul Arifin, MT
NIP. 19590813 198601 1 005

Ir. Achmad Wicaksono, M.Eng, Ph.D
NIP. 19680210 199203 1 001

Malang, 15 Januari 2018

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil
Ketua Program Magister Teknik Sipil

Ari Wibowo, ST, MT, Ph.D
NIP. 197408619 200012 1 002

JUDUL TESIS :

PENGGUNAAN *FLY ASH* SEBAGAI *FILLER* TERHADAP MODULUS RESILIEN
BETON ASPAL LAPIS AUS (AC-WC)

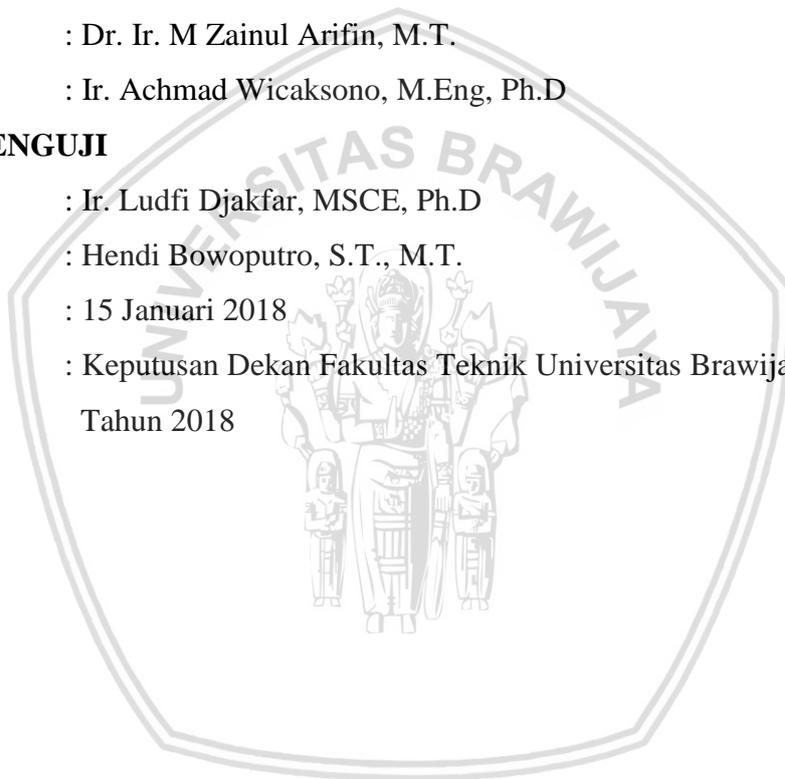
Nama Mahasiswa : M. Sadillah
NIM : 156060100111029
Program Studi : Teknik Sipil
Minat : Rekayasa Transportasi

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Dr. Ir. M Zainul Arifin, M.T.
Anggota : Ir. Achmad Wicaksono, M.Eng, Ph.D

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Ir. Ludfi Djakfar, MSCE, Ph.D
Dosen Penguji 2 : Hendi Bowoputro, S.T., M.T.
Tanggal Ujian : 15 Januari 2018
SK Penguji : Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya No.125
Tahun 2018





Tesis Ini Kupersembahkan pada :
Seluruh Civitas Akademika Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya



PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelurusan berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 15 Januari 2018

Mahasiswa

M. Sadillah

NIM. 156060100111029



RIWAYAT HIDUP

M. Sadillah, Banjarmasin, 22 Juli 1993, anak kedua dari tiga bersaudara Putra dari Bapak H. Mahyudin dan Ibu Hj. Rahimah. Pendidikan yang ditempuh yaitu SDN 5 Mentawa Baru Hilir lulus tahun 2003, SMPN 2 Sampit lulus tahun 2006, SMAN 2 Sampit lulus tahun 2010, dan kemudian melanjutkan S1 Pendidikan Teknik Bangunan Universitas Negeri Malang lulus tahun 2014.

Malang, Januari 2018

Penulis



RINGKASAN

M. Sadillah, Program Studi Magister Teknik Sipil, Minat Rekayasa Transportasi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2018, *Penggunaan Fly Ash Sebagai Filler Terhadap Modulus Resilien Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC)*, Dosen Pembimbing : M. Zainul Arifin dan Achmad Wicaksono.

Transportasi merupakan sektor yang mengkonsumsi bahan bakar minyak (BBM) cukup besar di Indonesia. Ketergantungan sektor transportasi terhadap BBM telah menimbulkan kekhawatiran karena jumlah cadangan dan produksi minyak bumi Indonesia terbatas dan pembakaran BBM menimbulkan pencemaran berat di kota besar dan juga berdampak pada perubahan iklim. Selain sebagai faktor penyebab terjadinya perubahan iklim transportasi juga mendapatkan imbas dari perubahan iklim. Dalam upaya meningkatkan kekuatan struktur campuran beton aspal lapisan aus (AC-WC) selain perlu adanya penggunaan campuran beraspal panas dengan spesifikasi baru, pemilihan jenis material yang digunakan adalah sangat penting. Selain aspal, agregat baik kasar maupun halus serta *filler* adalah salah satu komponen dalam suatu konstruksi perkerasan jalan yang mempunyai peranan besar. Penelitian bertujuan untuk mengetahui (1) berapa kadar aspal optimum (KAO) beton aspal lapis aus (AC-WC) (2) berapa kadar *filler* optimum beton aspal lapis aus (AC-WC) dengan variasi *filler fly ash*, ditinjau dari nilai parameter *marshall* (3) berapa kadar *filler* optimum beton aspal lapis aus (AC-WC) dengan variasi *filler fly ash* dan temperatur, ditinjau dari nilai parameter modulus resilien.

Dalam penelitian ini rancangan percobaan yang dilakukan yaitu (1) menggunakan kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5% 6% dan 6,5% untuk mendapatkan kadar aspal optimum (2) menggunakan kadar *filler fly ash* 5%, 6%, 7%, 8% dan 9% untuk mendapatkan kadar *filler* optimum. Kemudian dilakukan pemeriksaan yang terbagi dalam 3 (tiga) tahapan yaitu (1) tahapan pemilihan bahan; (2) tahap persiapan benda uji; (3) tahap penelitian dan analisis data. Secara umum penelitian ini dilakukan dengan pengujian alat *marshall* dan *UMATTA* sehingga didapatkan data mengenai karakteristik dan modulus resilien dari campuran beton aspal lapis aus (AC-WC).

Hasil pengujian campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) menunjukkan bahwa kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,5% dengan nilai VIM sebesar 3.70%, VMA sebesar 19,00%, Stabilitas sebesar 1.152,93 Kg, Flow sebesar 2,78 mm dan MQ sebesar 417,39 Kg/mm. Hasil pengujian campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dengan penggantian *filler fly ash* menunjukkan bahwa kadar campuran optimum yaitu sebesar 7% dengan nilai VIM sebesar 4,21%, VMA sebesar 19,21%, Stabilitas sebesar 1326.10Kg, Flow sebesar 3,69 mm dan MQ sebesar 360.13 Kg/mm. Hasil pengujian campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dengan penggantian *filler fly ash* menunjukkan bahwa nilai modulus resilien optimum yaitu sebesar 5% dan temperatur 25°C dengan nilai sebesar 3.283 MPa. Dari hasil analisa menyatakan bahwa data karakteristik tersebar secara normal dan menghasilkan nilai yang berbeda pada setiap persentase kadar *filler*, temperatur dan interaksi antara kadar *filler* dan temperatur. Penggunaan alat *UMATTA* menghasilkan nilai modulus resilien yang lebih akurat dan tingkat kesalahan yang sangat kecil. Pemilihan jenis campuran aspal sangat mempengaruhi nilai modulus resilien dimana dari hasil pengujian membuktikan bahwa campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dengan penggantian *filler fly ash* memiliki nilai modulus resilien yang tinggi membuat campuran aspal menjadi kaku sehingga tahan terhadap deformasi.

Kata Kunci : Marshall, AC-WC, Abu Terbang Batubara

SUMMARY

M. Sadillah, Master Program in Civil Engineering, Transportation Engineering Area, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, April 2017, *Study of Parking Vehicles Capacity, Needs and Effectivity at El Tari Airport Kupang*. Supervisor: Harnen Sulistio and Achmad Wicaksono.

Transportation is a sector that consumes fuel oil (BBM) is quite large in Indonesia. The dependence of the transport sector on fuel has raised concerns as the amount of Indonesia's oil reserves and production is limited and the burning of fuel causes heavy pollution in large cities and also impacts on climate change. Apart from being a factor causing climate change, transportation is also getting the impact of climate change. In an effort to increase the strength of mixed asphalt concrete structure (AC-WC) in addition to the use of hot asphalt mixture with new specification, the selection of material type used is very important. In addition to asphalt, both coarse and fine aggregates and fillers are one component in a pavement construction that has a large role. Research to determine (1) the optimum bitumen content (OBC) asphalt concrete layer wear (AC-WC) (2) how many levels of filler optimum asphalt concrete layer wear (AC-WC) with a variety of filler fly ash, in terms of the parameters marshall (3) how many levels of filler optimum wear layer asphalt concrete (AC-WC) with fly ash filler variations and temperature, in terms of resilient modulus parameter.

In this research, the experimental design is (1) using asphalt content of 4.5%, 5%, 5.5% 6% and 6.5% to obtain optimum asphalt content (2) using filler fly ash 5%, 6 %, 7%, 8% and 9% to obtain optimum filler content. Then the examination is divided into 3 (three) stages (1) the selection of materials ; (2) the preparation of the specimen ; (3) research and data analysis. In general, this research was done by testing the marshall and UMATTA tools to obtain data about the characteristics and modulus of resilen from concrete asphalt concrete mixture (AC-WC).

Asphalt concrete mixed test (AC-WC) showed that Asphalt Optimum (KAO) content with 5.5% asphalt content with VIM value of 3.70%, VMA of 19.00%, Stability of 1,152.93 Kg, Flow of 2.78 mm and MQ of 417.39 Kg / mm. The result of mixed asphalt concrete (AC-WC) asphalt with filler fly ash test showed that the optimum mixture content was 7% filler content with VIM value 4,21%, VMA 19,21%, Stability 1326.10Kg, Flow of 3.69 mm and MQ of 360.13 Kg / mm. The result of mixed asphalt concrete (AC-WC) asphalt with filler fly ash showed that the optimum resilient modulus value was 5% filler and 25°C with 3,283 MPa. From the analysis results stated that the characteristic data are normally distributed and produce different values on each percentage of filler content, temperature and interaction between filler and temperature levels. The use of the UMATTA tool yields a more accurate resilient modulus value and a very small error rate. The selection of the asphalt mixed type greatly influences the resilient modulus value where the test results prove that the mixture of AC-WC asphalt with the replacement of fly ash filler has a high resilient modulus value making the asphalt mixture rigid so that it is resistant to deformation.

Keywords: *Marshall, AC-WC, Fly Ash*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT karena atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis yang berjudul “Penggunaan *Fly Ash* Sebagai *Filler* Terhadap Modulus Resilien Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC)” ini dengan baik.

Tesis ini mengkaji tentang pengaruh modulus resilien terhadap perkerasan jalan dengan penggantian *filler* abu terbang batubara, yang diharapkan dengan penggantian *filler* ini dapat meningkatkan karakteristik campuran beton aspal terhadap sifat *marshall* maupun parameter modulus resilien, sehingga akan meningkatkan nilai struktural dari lapisan perkerasan.

Atas terselesaikannya penyusunan tesis ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dan ikut berperan secara moril ataupun materil, yaitu :

1. Dr. Ir. M Zainul Arifin, M.T., sebagai pembimbing utama yang telah banyak memberi motivasi, dukungan, masukan serta arahan yang luar biasa dalam penyelesaian tesis ini.
2. Ir. Achmad Wicaksono, M.Eng, Ph.D, sebagai pembimbing pendamping, yang selalu mengingatkan penulis dan memberikan arahan pada setiap tulisan yang tertuang pada tesis ini.
3. Ir. Ludfi Djakfar, MSCE, Ph.D, sebagai penguji satu yang begitu banyak memberi masukan dan arahan untuk menyempurnakan tulisan tesis ini.
4. Hendi Bowoputro, S.T., M.T., sebagai penguji dua yang memberikan banyak masukan dan arahan untuk menyempurnakan tulisan tesis ini.
5. Bapak/Ibu dosen pengajar di Program Magister Teknik Sipil untuk peminatan Rekayasa Transportasi FT UB atas segala ilmu, wawasan dan pengarahan yang diberikan.
6. Bapak H. Mahyudin dan Ibu Hj. Rahimah, orang tua tercinta yang tidak dapat penulis ungkapkan seberapa cinta, kasih dan teladan yang telah diberikan kepada penulis.
7. Pak Mukhlis, Ibu Itak, Mba Ratna, Mas Tatang, Ayu, Randa, Rendy, Dikka, Amy, sahabat-sahabatku yang selalu menginspirasi di setiap langkah penulis dan menjadi bagian perjalanan selama penulis menempuh studi di Rekayasa Transportasi UB.

8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang langsung maupun tidak langsung telah ikut membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan studi ini.

Tesis ini disusun dengan mengerahkan seluruh kemampuan dan potensi yang dimiliki penulis. Namun demikian, tesis ini masih banyak yang perlu disempurnakan. Oleh karena itu segala masukan, saran, dan kritik membangun sangat diharapkan oleh penulis untuk perbaikan dan kesempurnaan tulisan ini. Semoga tesis ini memberikan manfaat bagi pemerhati transportasi pada khususnya serta masyarakat akademisi pada umumnya.

Malang, Januari 2018

M. Sadillah



DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| DAFTAR LAMPIRAN | viii |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Identifikasi Masalah | 3 |
| 1.3 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah/Lingkup Pembahasan | 4 |
| 1.5 Tujuan | 4 |
| 1.6 Manfaat | 4 |
| TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Beton Aspal | 5 |
| 2.2 Bahan Campuran Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC) | 7 |
| 2.2.1 Aspal | 7 |
| 2.2.2 Agregat | 10 |
| 2.2.3 Bahan Pengisi (<i>Filler</i>) | 13 |
| 2.3 Karakteristik Campuran Beton Aspal (Parameter Marshall) | 15 |
| 2.3.1 <i>Void in Mixture (VIM)</i> | 15 |
| 2.3.2 <i>Void in Mineral Aggregate (VMA)</i> | 16 |
| 2.3.3 Stabilitas | 17 |
| 2.3.4 Flow | 17 |
| 2.3.5 <i>Marshall Quotient</i> | 18 |
| 2.4 Konsep Elastisitas Bitumen (Parameter Modulus Resilien) | 18 |
| 2.4.1 Estimasi Modulus Kekakuan Campuran Aspal | 23 |
| 2.5 Teknik Pengujian Data | 25 |
| 2.6 Penelitian Terdahulu | 27 |
| KERANGKA KONSEP PENELITIAN | 33 |
| 3.1 Kerangka Pemikiran | 33 |
| 3.2 Kerangka Konsep Penelitian | 34 |
| METODE PENELITIAN | 35 |
| 4.1 Tahapan Pelaksanaan Penelitian | 35 |



| | | |
|-----------------------------------|--|-----------|
| 4.2 | Tahap Pemilihan Bahan | 39 |
| 4.2.1 | Agregat | 39 |
| 4.2.2 | Aspal Minyak atau Aspal Keras Penetrasi 60/70 | 39 |
| 4.2.3 | Perencanaan Pencampuran | 40 |
| 4.2.4 | Perlakuan dan Ulangan | 40 |
| 4.2.5 | Variabel Pengamatan | 41 |
| 4.2.6 | Waktu Pelaksanaan Penelitian | 41 |
| 4.3 | Persiapan Benda Uji | 42 |
| 4.3.1. | Persiapan Agregat | 42 |
| 4.3.2. | Persiapan Aspal | 43 |
| 4.3.3. | Persiapan <i>Filler</i> | 45 |
| 4.3.4. | Pembuatan Benda Uji | 45 |
| 4.4 | Tahap Analisis Data | 46 |
| 4.4.1 | Uji Kenormalan Data | 46 |
| 4.4.2 | Uji Varian Dua Arah | 47 |
| 4.4.3 | Analisa Regresi | 49 |
| 4.4.4 | Metode Diagram Pita | 50 |
| HASIL DAN PEMBAHASAN | | 51 |
| 5.1 | Data Hasil Pengujian | 51 |
| 5.1.1 | Pengujian Agregat | 51 |
| 5.1.2 | Pengujian Aspal | 52 |
| 5.2 | Hasil Uji Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC – WC) | 52 |
| 5.2.1 | <i>Void in Mixture (VIM)</i> | 52 |
| 5.2.2 | <i>Voids in Mineral Agregate (VMA)</i> | 53 |
| 5.2.3 | Stabilitas | 54 |
| 5.2.4 | <i>Flow</i> | 54 |
| 5.2.5 | <i>Marshall Quotient</i> | 55 |
| 5.3 | Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) | 56 |
| 5.4 | Hasil Uji Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC – WC) Dengan Variasi Kadar <i>Filler Fly Ash</i> | 57 |
| 5.4.1 | <i>Void in Mixture (VIM)</i> | 58 |
| 5.4.2 | <i>Voids in Mineral Agregate (VMA)</i> | 58 |
| 5.4.3 | Stabilitas | 59 |
| 5.4.4 | <i>Flow</i> | 60 |
| 5.4.5 | <i>Marshall Quotient</i> | 60 |
| 5.5 | Penentuan Kadar Campuran Optimum Dengan Variasi Kadar <i>Filler Fly Ash</i> | 61 |
| 5.6 | Hasil Uji Modulus Resilien Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC – WC) Dengan Variasi Kadar <i>Filler Fly Ash</i> | 63 |

5.6.1 Uji Statistik Pengaruh Modulus Resilien Terhadap Kadar Campuran Dengan Variasi Kadar *Filler Fly Ash* 63

5.7 Rasio Hubungan Modulus Resilien Terhadap Karakteristik Marshall 69

5.8 Pembahasan 72

PENUTUP **73**

6.1 Kesimpulan 73

6.2 Saran 73

DAFTAR PUSTAKA **75**

LAMPIRAN **79**



DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|--|---------|
| Tabel 2.1. Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Beton Aspal..... | 6 |
| Tabel 2.2. Persyaratan Aspal | 9 |
| Tabel 2.3. Contoh Komponen Fraksional Aspal di Indonesia..... | 10 |
| Tabel 2.4. Ketentuan Agregat Kasar | 11 |
| Tabel 2.5. Pengujian dan Sifat-sifat Teknis Agregat Halus | 12 |
| Tabel 2.6. Gradasi Agregat..... | 13 |
| Tabel 2.7. Komposisi Kimia Abu Terbang Batubara | 14 |
| Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu..... | 27 |
| Tabel 2.9. Rancangan Penilitan | 32 |
| Tabel 4.1. Kebutuhan Agregat Untuk Satu Benda Uji | 39 |
| Tabel 4.2. Daftar Perencanaan Pencampuran Benda Uji..... | 40 |
| Tabel 4.3. Jumlah Tumbukan Masing-masing Sisi Benda Uji | 46 |
| Tabel 4.4. Analisis Data | 48 |
| Tabel 5.1. Data Hasil Pengujian Agregat Kasar, Halus dan <i>Filler Fly Ash</i> | 51 |
| Tabel 5.2. Data Hasil Pengujian Aspal | 52 |
| Tabel 5.3. Hasil Pengujian Marshall Terhadap KAO | 52 |
| Tabel 5.4. Hasil Pengujian Marshall Terhadap Variasi <i>Filler Fly Ash</i> | 57 |
| Tabel 5.5. Nilai Desirability dari Kombinasi Perlakuan | 65 |
| Tabel 5.6. Tabel ANOVA Modulus Resilien Berdasarkan Kadar <i>Filler</i> dan Temperatur.. | 65 |
| Tabel 5.7. Uji Normalitas Sisaan..... | 66 |
| Tabel 5.8. Uji BNT Modulus Resilien Berdasarkan Kadar <i>Filler</i> | 66 |
| Tabel 5.9. Uji BNT Modulus Resilien Berdasarkan Temperatur | 67 |
| Tabel 5.10. Uji Duncan pada Kombinasi Antara Kadar <i>Filler</i> dan Temperatur | 68 |
| Tabel 5.11. Hasil Pengujian Dengan Alat UMATTA | 69 |
| Tabel 5.12. Hasil Pengujian Dengan Alat UMATTA | 70 |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|--|---------|
| Gambar 2.1. Tegangan spesimen geomaterial di bawah tes beban berulang | 19 |
| Gambar 2.2. Konsep Tegangan Untuk Pengujian Modulus Resilien | 20 |
| Gambar 3.1. Kerangka Konsep Penelitian..... | 34 |
| Gambar 4.1. Diagram Alir Penelitian..... | 36 |
| Gambar 4.2. Diagram Alir Penentuan Kadar Campuran Optimum Ditinjau Dari Nilai Parameter Marshall..... | 37 |
| Gambar 4.3. Diagram Alir Penentuan Kadar Campuran Optimum Ditinjau Dari Nilai Parameter UMATTA..... | 38 |
| Gambar 5.1. Hubungan Antara Kadar Aspal dengan <i>VIM</i> | 53 |
| Gambar 5.2. Hubungan Antara Kadar Aspal dengan <i>VMA</i> | 53 |
| Gambar 5.3. Hubungan Antara Kadar Aspal dan dengan Stabilitas | 54 |
| Gambar 5.4. Hubungan Antara Kadar Aspal dan dengan <i>Flow</i> | 55 |
| Gambar 5.5. Hubungan Antara Kadar Aspal dengan <i>Marshall Quotient</i> | 55 |
| Gambar 5.6. Kadar Aspal Optimum (KAO) | 57 |
| Gambar 5.7. Hubungan Antara Kadar <i>Filler Fly Ash</i> dengan <i>VIM</i> | 58 |
| Gambar 5.8. Hubungan Antara Kadar <i>Filler Fly Ash</i> dengan <i>VMA</i> | 59 |
| Gambar 5.9. Hubungan Antara Kadar <i>Filler Fly Ash</i> dengan Stabilitas..... | 59 |
| Gambar 5.10. Hubungan Antara Kadar <i>Filler Fly Ash</i> dengan <i>Flow</i> | 60 |
| Gambar 5.11. Hubungan Antara Kadar <i>Filler Fly Ash</i> dengan <i>MQ</i> | 61 |
| Gambar 5.12. Kadar Campuran Optimum | 62 |
| Gambar 5.13. Hubungan Antara Temperatur Pengujian dengan Modulus Resilien..... | 63 |
| Gambar 5.14. Grafik 3D Modulus Resilien Berdasarkan Kadar <i>Filler</i> dan <i>Temperatur</i> | 64 |
| Gambar 5.15. Grafik 3D Modulus Resilien Berdasarkan Kadar <i>Filler</i> dan <i>Temperatur</i> | 64 |
| Gambar 5.16. Hubungan Modulus Resilien Terhadap Stabilitas Marshall (a) Stabilitas (b) Modulus Resilien..... | 71 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|---|---------|
| Lampiran 1 Hasil Pengujian Agregat Kasar | 80 |
| Lampiran 2 Hasil Pengujian Agregat Halus | 81 |
| Lampiran 3 Hasil Pengujian <i>Filler</i> | 82 |
| Lampiran 4 Hasil Pengujian Keausan Agregat | 83 |
| Lampiran 5 Hasil Pengujian Impact Value | 84 |
| Lampiran 6 Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal | 85 |
| Lampiran 7 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal | 86 |
| Lampiran 8 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal | 87 |
| Lampiran 9 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal | 88 |
| Lampiran 10 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal | 90 |
| Lampiran 11 Contoh Perhitungan <i>Marshall Test</i> | 91 |
| Lampiran 12 Contoh Tabel Perhitungan <i>Marshall</i> | 93 |
| Lampiran 13 Tabel Perhitungan Kadar Aspal Optimum (KAO) | 94 |
| Lampiran 14 Tabel Perhitungan Kadar Filler Optimum | 96 |
| Lampiran 12 Dokumentasi | 98 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim merupakan suatu fenomena yang telah terjadi dan dampaknya sudah dirasakan oleh berbagai pihak. Perubahan iklim memberikan dampak yang cukup besar terhadap pembangunan sosial ekonomi Indonesia. Untuk itu strategi mengutamakan isu perubahan iklim ke dalam perencanaan pembangunan nasional termasuk koordinasi, sinergi, monitoring dan evaluasi merupakan tantangan terhadap perubahan iklim. Sektor transportasi merupakan salah satu faktor yang secara signifikan memberikan kontribusi terhadap penyebab terjadinya perubahan iklim. Transportasi merupakan sektor yang mengkonsumsi bahan bakar minyak (BBM) cukup besar di Indonesia. Ketergantungan sektor transportasi terhadap BBM telah menimbulkan kekhawatiran karena jumlah cadangan dan produksi minyak bumi Indonesia terbatas dan pembakaran BBM menimbulkan pencemaran berat di kota besar dan juga berdampak pada perubahan iklim.

Selain sebagai faktor penyebab terjadinya perubahan iklim transportasi juga mendapatkan imbas dari perubahan iklim. Hasil penelitian Sudjatmiko (1999) di Jakarta menunjukkan bahwa nilai *Mean Monthly Air Temperature (MMAT)* 27,6°C sedangkan pada tahun 2017 menurut *worldweatheronline.com* temperatur rata - rata di Jakarta pada tahun 2015 mencapai 33°C. Dimana temperatur tertinggi terjadi pada bulan oktober sebesar 38°C.

Bitumen merupakan bahan *visco-elastis*, sehingga perubahan bentuknya jika menerima tegangan merupakan fungsi dari temperatur dan waktu pembebanan Brown (1990). Pada temperatur yang tinggi dan waktu pembebanan yang lama dia akan bersifat *viscous liquids*, sedangkan pada temperatur rendah dan waktu pembebanan yang pendek bitumen akan bersifat elastis tetapi getas. Perubahan temperatur merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhitungkan dalam desain struktur perkerasan aspal, karena pada kenyataannya modulus lapis aspal di lapangan sangat dipengaruhi oleh temperatur.

AASHTO mulai tahun 1986 dalam perancangan tebal lapis perkerasan jalan raya telah mulai menggunakan modulus Resilien untuk menentukan koefisien lapis perkerasan jalan raya. Modulus Resilien merupakan faktor yang sangat penting yang akan mempengaruhi

kinerja perkerasan aspal. Jika modulus Resilien bahan mulai menurun, seperti misalnya terjadinya penuaan aspal, maka perkerasan aspal akan menjadi mudah retak saat menerima beban yang berat. Jika terjadi kemacetan lalu lintas waktu pembebanan terhadap lapisan perkerasan jalan akan bertambah sehingga jalan tersebut akan mudah menjadi rusak.

Dari segi pelaksanaan konstruksi jalan beton aspal, pengendalian kualitas di lapangan kurang sesuai dengan persyaratan bahan campuran yang di laboratorium. Pengendalian kualitas terhadap perkerasan yang telah digelar di lapangan hanya meliputi kepadatan dan ketebalan gelaran. Padahal dari persyaratan campuran perlu di kendalikan juga gradasi, stabilitas dan rongga dalam campuran. Demikian pula dari segi perencanaan tebal perkerasan kualitas bahan beton aspal yang dimasukkan sebagai parameter adalah modulus Resilien (AASHTO (1993) dan Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2002)).

Dalam upaya meningkatkan kekuatan struktur campuran beton aspal lapisan aus (AC-WC) selain perlu adanya penggunaan campuran beraspal panas dengan spesifikasi baru, pemilihan jenis material yang digunakan adalah sangat penting. Selain aspal, agregat baik kasar maupun halus serta *filler* adalah salah satu komponen dalam suatu konstruksi perkerasan jalan yang mempunyai peranan besar. Prosentase yang kecil pada *filler* terhadap campuran bukan berarti tidak mempunyai efek yang besar pada sifat-sifat *marshall* yang juga merupakan kinerja campuran terhadap beban lalu lintas (Putrowijoyo:2006). Sementara penggunaan *filler* dengan berat jenis yang jauh lebih kecil dari pada berat jenis agregat kasar dan halus akan menyebabkan campuran menjadi kurang aspal, yang ditandai dengan nilai rongga dalam campuran (VIM) yang lebih besar dari batas spesifikasi atas (5%) dan nilai rongga terisi aspal (VFA) yang lebih kecil dari batas spesifikasi bawah (76%) (Widodo: 2000). Sedangkan menurut Pratomo (1999), bahwa bahan semen dan abu batu (*fly ash*) merupakan bahan terbaik yang boleh dipakai sebagai bahan pengisi. *Fly ash* (abu terbang) adalah salah satu residu yang dihasilkan dalam pembakaran industri batubara atau Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang terdiri dari partikel-partikel halus yang berterbangan. Dibanyak pabrik atau industri *fly ash* dianggap sebagai limbah yang tidak digunakan lagi sehingga dalam penelitian ini menjadi nilai tambah dan nilai guna dari bahan tersebut untuk dapat dimanfaatkan sebaik mungkin. Menurut Tahir (2009) abu terbang batubara dapat dijadikan sebagai mineral *filler* dikarenakan abu terbang batubara mengandung unsur *pozzolan* sehingga dapat berfungsi sebagai bahan pengisi rongga dan pengikat beton aspal. Menurut Nugroho (2010) penggantian sebagian semen dengan *fly ash* selain dapat menambah *workability* karena peningkatan gradasi ukuran *fly ash* yang sangat halus, mengurangi dampak negatif

terhadap lingkungan dengan mengurangi lahan pembuangan limbah dan mengurangi penggunaan energi untuk produksi semen, juga peningkatan durabilitas campuran beton aspal.

Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai variasi temperatur dan prosentase *filler fly ash* terhadap modulus Resilien yang baik sehingga dapat diterapkan dan mampu mengatasi kerusakan-kerusakan. Melalui pengujian yang akan dilakukan maka diharapkan dapat mengetahui sifat – sifat mekanik, sifat - sifat fisik dan lain sebagainya dari suatu bahan bitumen. Sifat mekanik adalah kemampuan suatu bahan bitumen untuk menerima beban atau gaya tanpa menimbulkan kerusakan pada benda tersebut. Sifat – sifat mekanik antara lain kekuatan (*strenght*), kekerasan (*hardness*), kekenyalan (*elasticity*), kekakuan (*stifness*), plastisitas (*plasticity*), ketangguhan (*toughness*), merangkak (*creep*), kelelahan (*fatigue*). Tetapi sifat mekanik yang diuji dengan alat UMATTA yaitu untuk mengetahui nilai plastisitas (*plasticity*) dari suatu bahan bitumen hingga mencapai titik runtuh. Selain itu campuran beton aspal yang diteliti ditambahi dengan *filler fly ash* yang dapat menghemat biaya operasional jika dibandingkan dengan penggunaan semen *portland* secara keseluruhan. Dalam penelitian yang akan dilakukan *filler* yang digunakan yaitu *fly ash* (abu terbang). Maka dari itu dalam penelitian ini akan dikaji pengaruh variasi temperatur dengan *filler* pengganti *fly ash*. Pengaruh variasi temperatur dengan *filler* pengganti diharapkan akan meningkatkan karakteristik campuran beton aspal terhadap sifat *marshall* maupun parameter modulus Resilien, sehingga akan meningkatkan nilai struktural dari lapisan perkerasan seperti nilai stabilitas, fleksibilitas, durabilitas dan impermeabilitas (kedap air).

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan penelitian yang akan dilakukan mengidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Pemilihan kadar aspal optimum pada campuran aspal beton lapis aus (*AC – WC*).
2. Pemilihan kadar proposional *filler fly ash* sebagai *filler* pengganti dari semen *portland* campuran aspal beton lapis aus (*AC – WC*).
3. Penelitian ini bisa menjadi landasan atau penetapan modulus Resilien dari campuran aspal beton lapis aus (*AC – WC*) terkait dengan sifat mekanik bahan bitumen.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Berapa kadar aspal optimum (KAO) beton aspal lapis aus (AC-WC), ditinjau dari nilai parameter *marshall*?
2. Berapa kadar *filler* optimum beton aspal lapis aus (AC-WC) dengan variasi *filler fly ash*, ditinjau dari nilai parameter *marshall*?
3. Berapa kadar *filler* optimum beton aspal lapis aus (AC-WC) dengan variasi *filler fly ash* dan temperatur, ditinjau dari nilai Modulus Resilien?

1.4 Batasan Masalah/Lingkup Pembahasan

Batasan-batasan penelitian yang ditetapkan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Aspal yang digunakan adalah aspal minyak/aspal keras penetrasi 60/70.
2. Bahan agregat yang digunakan didapat dari PT. Merak Jaya Beton yang diambil dari daerah Kec. Wlingi Kab. Blitar – Jawa Timur.
3. Bahan pengisi (*filler*) *fly ash* yang digunakan sebagai campuran benda uji didapat dari PLTU di Paiton – Jawa Timur.
4. Variasi temperatur pengujian dengan alat UMATTA adalah 25°C – 45°C.

1.5 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui berapa kadar aspal optimum (KAO) beton aspal lapis aus (AC-WC), ditinjau dari nilai parameter *marshall*.
2. Mengetahui berapa kadar *filler* optimum beton aspal lapis aus (AC-WC) dengan variasi *filler fly ash*, ditinjau dari nilai parameter *marshall*.
3. Mengetahui berapa kadar *filler* optimum beton aspal lapis aus (AC-WC) dengan variasi *filler fly ash* dan temperatur, ditinjau dari nilai parameter Modulus Resilien

1.6 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik dari segi :

1. Praktis : sebagai rekomendasi bagi penelitian lain untuk digunakan sebagai pijakan dalam pengembangan teknologi perkerasan jalan raya menggunakan bahan laston.
2. Akademik : diharapkan dapat mengetahui hasil data melalui parameter *marshall* dan cara pembeda pada campuran beton aspal lapis aus (AC-WC). Selain itu dapat mengetahui temperatur pengujian dan bahan pengisi (*filler*) yang paling baik untuk digunakan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Aspal

Beton aspal adalah tipe campuran pada lapisan penutup konstruksi perkerasan jalan yang mempunyai nilai struktural dengan kualitas yang tinggi, terdiri atas agregat yang berkualitas yang dicampur dengan aspal sebagai bahan pengikatnya. Material-material pembentuk beton aspal dicampur di instalasi pencampur pada *temperatur* tertentu, kemudian diangkut ke lokasi, dihamparkan, dan dipadatkan. *Temperatur* pencampuran ditentukan berdasarkan jenis aspal apa yang akan digunakan. Pembuatan beton aspal dimaksudkan untuk mendapatkan suatu lapisan permukaan atau lapis antara pada perkerasan jalan raya yang mampu memberikan sumbangan daya dukung yang terukur serta berfungsi sebagai lapisan kedap air yang dapat melindungi konstruksi di bawahnya. Sebagai lapis permukaan, lapis beton aspal harus dapat memberikan kenyamanan dan keamanan yang tinggi (Departemen Pekerjaan Umum, 1987)

Dalam pencampuran aspal harus dipanaskan untuk memperoleh tingkat kecairan (*viskositas*) yang tinggi agar dapat mendapatkan mutu campuran yang baik dan kemudahan dalam pelaksanaan. Pemilihan jenis aspal yang akan digunakan ditentukan atas dasar iklim, kepadatan lalu lintas dan jenis konstruksi yang akan digunakan.

Merujuk pada SNI 03-1737-1989 tentang jenis beton aspal yang dapat dibedakan atas:

1. Latacir (lapis tipis aspal pasir/*sand sheet*) kelas A dan kelas B, adalah lapis penutup permukaan jalan yang terdiri atas agregat halus atau pasir atau campuran keduanya dan aspal keras yang dicampur, dihampar dan dipadatkan dalam keadaan panas pada temperatur tertentu. Pemilihan kelas A atau kelas B terutama tergantung pada gradasi pasir yang digunakan.
2. Lataston (lapis tipis beton aspal/*HRS*), adalah lapis permukaan yang terdiri atas lapis aus (lataston lapis aus/*HRS-WC*) dan lapis permukaan antara (lataston lapis permukaan antara/*HRS-Binder*) yang terbuat dari agregat yang bergradasi senjang dengan dominasi pasir dan aspal keras yang dicampur, dihampar dan dipadatkan dalam keadaan panas pada temperatur tertentu. Untuk mendapatkan hasil yang

memuaskan, maka campuran harus dirancang sampai memenuhi semua ketentuan yang diberikan dalam spesifikasi.

3. Laston adalah lapis permukaan atau lapis pondasi yang terdiri atas laston lapis aus (*AC-WC*), laston lapis permukaan antara (*AC-BC*) dan laston lapis pondasi (*AC-Base*). Setiap jenis campuran *AC* yang menggunakan bahan aspal polimer atau aspal dimodifikasi dengan asbuton atau aspal *multigrade* atau aspal keras Pen 60 dengan menggunakan Asbuton butir disebut masing-masing sebagai *AC-WC modified*, *AC-BC modified*, dan *AC-Base modified*.

Jenis beton aspal dapat dibedakan berdasarkan *temperatur* pencampuran material pembentuk beton aspal, dan fungsi beton aspal. Sedangkan berdasarkan fungsinya beton aspal dapat dibedakan atas (Sukirman, 2003):

1. Beton aspal untuk lapisan aus/*wearing course* (*WC*), adalah lapisan perkerasan yang berhubungan langsung dengan ban kendaraan, merupakan lapisan yang kedap air, tahan terhadap cuaca, dan mempunyai kekesatan yang diisyaratkan.
2. Beton aspal untuk lapisan pondasi/*binder course* (*BC*), adalah lapisan perkerasan yang terletak di bawah lapisan aus. Tidak berhubungan langsung dengan cuaca, tetapi perlu stabilisasi untuk memikul beban lalu lintas yang dilimpahkan melalui roda kendaraan.
3. Beton aspal untuk pembentuk dan perata lapisan beton aspal yang sudah lama, yang pada umumnya sudah aus dan seringkali tidak lagi berbentuk *crown*.

Deskripsi lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.1. Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Beton aspal.

Tabel 2.1. Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Beton Aspal

| Sifat-sifat Campuran | Lapis Aus | Laston | |
|--|-----------|--------------|--------------------|
| | | Lapis Antara | Pondasi |
| Jumlah tumbukan per bidang | | 75 | 112 ⁽¹⁾ |
| Rasio partikel lolos ayakan Min. | | 1,0 | |
| 0,075mm dengan kadar aspal efektif Maks. | | 1,4 | |
| Rongga dalam campuran (%) ⁽²⁾ | Min. | 3,0 | |
| | Maks. | 5,0 | |
| Rongga dalam Agregat (VMA) (%) | Min. | 15 | 13 |

Tabel 2.1. Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Beton Aspal

| Sifat-sifat Campuran | | Laston | | |
|---|-------|-----------|--------------|---------------------|
| | | Lapis Aus | Lapis Antara | Pondasi |
| Rongga Terisi Aspal (%) | Min. | 65 | 65 | 65 |
| Stabilitas Marshall (kg) | Min. | | 800 | 1800 ⁽¹⁾ |
| Pelelehan (mm) | Min. | | 2 | 3 |
| | Maks. | | 4 | 6 ⁽¹⁾ |
| Marshall Quotient (kg/mm) | Min. | | 250 | 300 |
| Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C ⁽³⁾ | Min. | | 90 | |
| Rongga dalam campuran (%) pada Kepadatan membal (refusal) ⁽⁴⁾ | Min. | | 2 | |

(Sumber : Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

2.2 Bahan Campuran Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC)

2.2.1 Aspal

Aspal merupakan senyawa hidrokarbon berwarna coklat gelap atau hitam pekat yang dibentuk dari unsur-unsur *asphaltenes*, *resins*, dan *oils*. Aspal pada lapis perkerasan berfungsi sebagai bahan ikat antara agregat untuk membentuk suatu campuran yang kompak, sehingga akan memberikan kekuatan masing-masing agregat (*Kerbs and Walker*, 1971). Selain sebagai bahan ikat, aspal juga berfungsi untuk mengisi rongga antara butir agregat dan pori-pori yang ada dari agregat itu sendiri.

Aspal terdiri dari *Asphaltenes*, *Malthenes*, dan *Oils*. *Asphaltenes* adalah komponen utama dari aspal sekitar 80 %, *malthenes* terdiri dari zat-zat yang memberikan stabilitas pada *asphaltenes* yang mempengaruhi viskositas dan kelelehan (berfungsi sebagai *flux*). *Oils* memberi sifat adhesif dan pemuluran (daktilitas).

Pada temperatur ruang aspal bersifat *thermoplastis*, sehingga aspal akan mencair jika dipanaskan sampai pada temperatur tertentu dan kembali membeku jika temperatur turun. Bersama agregat, aspal merupakan material pembentuk campuran perkerasan jalan. Banyaknya aspal dalam campuran perkerasan berkisar antara 4-10% berdasarkan berat campuran, atau 10-15% berdasarkan volume campuran (Sukirman, 2003). Fungsi aspal pada perkerasan jalan adalah :

1. Sebagai bahan pengikat antara agregat maupun antara aspal itu sendiri.

2. Sebagai bahan pengisi, mengisi rongga antara butir-butir agregat dan pori-pori yang ada dari agregat itu sendiri.

Berdasarkan tempat diperolehnya, aspal dibedakan atas aspal alam dan aspal minyak. Aspal alam yaitu aspal yang didapat di suatu tempat di alam, dan dapat digunakan sebagaimana diperolehnya atau dengan sedikit pengolahan. Aspal minyak adalah aspal yang merupakan residu pengilangan minyak bumi.

Aspal minyak adalah aspal yang merupakan residu destilasi minyak bumi. Setiap minyak bumi dapat menghasilkan residu jenis *asphaltic base crude oil* yang banyak mengandung aspal, *parafin base crude oil* yang mengandung banyak *parafin*, atau *mixed base crude oil* yang mengandung campuran antara *parafin* dan aspal. Untuk perkerasan jalan umumnya digunakan aspal minyak jenis *asphaltic base crude oil*. Menurut tingkat kekerasannya aspal minyak atau aspal murni atau *petroleom asphalt*, diklasifikasikan menjadi:

Aspal keras atau aspal panas atau aspal semen (*Asphalt Cement*), merupakan aspal yang digunakan dalam keadaan panas. Aspal ini berbentuk padat pada keadaan penyimpanan dalam temperatur ruang (250-300°C). Merupakan jenis aspal buatan yang langsung diperoleh dari penyaringan minyak dan merupakan aspal yang terkeras. Berdasarkan tingkat kekerasan atau kekentalannya, maka aspal semen dibedakan menjadi:

- | | | |
|--------------|----------------|----------------|
| (1) AC 40-50 | (3) AC 85-100 | (5) AC 200-300 |
| (2) AC 60-70 | (4) AC 120-150 | |

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.2. berikut ini:

Tabel 2.2. Persyaratan Aspal

| No | Jenis Pengujian | Metoda Pengujian | Tipe I Aspal Pen. 60-70 | Tipe II Aspal yang Dimodifikasi | |
|---|---|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| | | | | A ⁽¹⁾ Asbuton yg diproses | B Elastomer Sintetis |
| 1 | Penetrasi 25°C (0,1 mm) | SNI 06-2456-1991 | 60-70 | Min.50 | Min.40 |
| 2 | Viskositas Dinamis 60°C (Pa.s) | SNI 06-6441-2000 | 160 - 240 | 240 - 360 | 320 - 480 |
| 3 | Viskositas 135°C (cSt) | SNI 06-6441-2000 | ≥300 | 385 – 2000 | ≤ 3000 |
| 4 | Titik Lembek (°C) | SNI 2434:2011 | ≥48 | ≥53 | ≥54 |
| 5 | Daktilitas pada 25°C, (cm) | SNI 2432:2011 | ≥100 | ≥ 100 | ≥ 100 |
| 6 | Titik Nyala (°C) | SNI 2433:2011 | ≥232 | ≥232 | ≥232 |
| 7 | Kelarutan dalam Trichloroethylene (%) | AASHTO T44-03 | ≥99 | ≥ 90 ⁽¹⁾ | ≥99 |
| 8 | Berat Jenis | SNI 2441:2011 | ≥1,0 | ≥1,0 | ≥1,0 |
| 9 | Stabilitas Penyimpanan: Perbedaan Titik Lembek (°C) | ASTM D 5976 part 6.1 | - | ≤2,2 | ≤2,2 |
| 10 | Partikel yang lebih halus dari 150 micron (µm) (%) | - | - | - | - |
| Pengujian Residu hasil TFOT atau RTFOT : | | | | | |
| 11 | Berat yang Hilang (%) | SNI 06-2441-1991 | ≤ 0.8 | ≤ 0.8 | ≤ 0.8 |
| 12 | Viskositas Dinamis 60°C (Pa.s) | SNI 03-6441-2000 | ≤ 800 | ≤ 1200 | ≤ 1600 |
| 13 | Penetrasi 25°C (%) | SNI 06-2456-1991 | ≥ 54 | ≥ 54 | ≥54 |
| 14 | Daktilitas 25°C (cm) | SNI 2432:2011 | ≥ 100 | ≥ 50 | ≥ 25 |
| 15 | Keelastisan setelah Pengembalian (%) | AASHTO T 301-98 | - | - | ≥ 60 |

(Sumber : Kementerian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

Angka-angka tersebut menunjukkan kekerasan aspal, yaitu yang paling keras adalah AC 40-50 dan yang terluak adalah AC 200-300. Angka kekerasan adalah berapa dalam masuknya jarum penetrasi ke dalam contoh aspal. Aspal dengan penetrasi rendah digunakan di daerah bercuaca panas atau lalulintas dengan volume tinggi, sedangkan aspal dengan penetrasi tinggi digunakan untuk daerah bercuaca dingin atau lalulintas dengan volume rendah. Di Indonesia pada umumnya dipergunakan aspal dengan penetrasi 60-70 dan 80-100.

Aspal terdiri dari senyawa hidrokarbon, nitrogen dan logam lain, sesuai jenis minyak bumi dan proses pengolahannya. Mutu kimiawi aspal ditentukan dari komponen pembentuk aspal. Saat ini telah banyak metode yang digunakan untuk meneliti komponen-komponen pembentuk aspal. Secara garis besar komposisi kimia aspal terdiri dari *asphaltenese*, *resins* dan *oils*. *Asphaltenese* terutama terdiri dari senyawa hidrokarbon, merupakan material berwarna hitam atau coklat tua yang tidak larut dalam *n-heptane*. *Asphaltenese* menyebar di dalam larutan yang disebut *maltenese*. *Maltenese* larut dalam *heptane*, merupakan cairan kental yang terdiri dari *resins* dan *oils*. *Resins* adalah cairan berwarna kuning atau coklat tua yang memberikan sifat adhesi dari aspal, merupakan bagian yang mudah hilang atau berkurang selama masa pelayanan jalan, sedangkan *oils* yang berwarna lebih muda merupakan media dari *asphaltenes* dan *resin*. *Maltenes* merupakan komponen yang mudah berubah sesuai dengan perubahan temperatur dan umur pelayanan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.3:

Tabel 2.3. Contoh Komponen Fraksional Aspal di Indonesia

| Komponen Fraksional Aspal | Aspal Pen 60 | Aspal Pen 80 |
|---------------------------|--------------|--------------|
| <i>Asphaltenes</i> | 22,41 | 24,34 |
| <i>Nitrogen Bases</i> | 24,90 | 27,60 |
| <i>Accidafin I (A1)</i> | 14,50 | 7,96 |
| <i>Accidafin II (A2)</i> | 18,97 | 18,76 |
| <i>Parafin</i> | 19,22 | 21,34 |

(Sumber: Sukirman, 2003)

2.2.2 Agregat

Agregat adalah sekumpulan butir-butir batu pecah, kerikil, pasir atau mineral lainnya, baik berupa hasil alam maupun buatan (Departemen Pekerjaan Umum, 1987). Fungsi dari agregat dalam campuran aspal adalah sebagai kerangka yang memberikan stabilitas campuran jika dilakukan dengan alat pemadat yang tepat. Agregat sebagai komponen

utama atau kerangka dari lapisan perkerasan jalan yaitu mengandung 90%-95% agregat berdasarkan persentase berat atau 75%-85% agregat berdasarkan persentase volume (Sukirman, 2003).

Pemilihan jenis agregat yang sesuai untuk digunakan pada konstruksi perkerasan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu gradasi, kekuatan, bentuk butir, tekstur permukaan, kelekatan terhadap aspal serta kebersihan dan sifat kimia. Jenis dan campuran agregat sangat mempengaruhi daya tahan atau stabilitas suatu perkerasan jalan (*Kerbs and Walker, 1971*).

Menurut Sukirman (1999) salah satu klasifikasi agregat yaitu agregat buatan, agregat yang merupakan mineral *filler*/pengisi (partikel dengan ukuran < 0,075 mm), diperoleh dari hasil sampingan pabrik-pabrik semen dan pemecah batu. Berdasarkan besar partikel-partikel (ukuran butiran) agregat, dapat dibedakan menjadi:

1. Agregat kasar adalah agregat yang tertahan pada saringan No.4 (4,75 mm). Lihat Tabel 2.4.
2. Agregat halus adalah agregat yang lolos saringan no.4 dan tertahan no.200 (0,075 mm). Lihat Tabel 2.5.

Tabel 2.4. Ketentuan Agregat Kasar

| Pengujian | | Standar | Nilai |
|---|---|---------------------------------|---------------------|
| Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan | natrium sulfat | SNI 3407:2008 | Maks.12 % |
| | magnesium sulfat | | Maks.18 % |
| Abrasi dengan mesin Los Angeles ¹⁾ | campuran AC bergradasi kasar | 100 putaran | Maks. 6% |
| | | 500 putaran | Maks. 30% |
| | Semua jenis campuran aspal bergradasi lainnya | 100 putaran | Maks. 8% |
| | | 500 putaran | Maks. 40% |
| Kelekatan agregat terhadap aspal | | SNI 2439:2011 | Min. 95 % |
| Butir Pecah pada Agregat Kasar | | SNI 7619:2012 | 95/90 ^{*)} |
| Partikel Pipih dan Lonjong | | ASTM D4791 Perbandingan 1 :5 | Maks. 10 % |
| Material lolos Ayakan No.200 | | SNI 03-4142-1996 | Maks. 2 % |

^(*) 95/90 menunjukkan 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

(Sumber : Kementerian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

Tabel 2.5. Pengujian dan Sifat-sifat Teknis Agregat Halus

| Pengujian | Standar | Nilai |
|--|--------------------|-----------|
| Nilai Setara Pasir | SNI 03-4428-1997 | Min. 60% |
| Angularitas dengan Uji Kadar Rongga | SNI 03-6877-2002 | Min. 45 |
| Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat | SNI 03-4141-1996 | Maks. 1% |
| Agregat Lolos Ayakan No.200 | SNI ASTM C117:2012 | Maks. 10% |

(Sumber : Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

Gradasi atau distribusi partikel-partikel berdasarkan ukuran agregat merupakan hal yang penting dalam menentukan stabilitas perkerasan. Gradasi agregat mempengaruhi besarnya rongga antar butir yang akan menentukan stabilitas dan kemudahan dalam proses pelaksanaan. Salah satu jenis gradasi yaitu gradasi rapat yang merupakan campuran agregat kasar dan halus dalam porsi yang berimbang, sehingga dinamakan juga agregat bergradasi baik (*well graded*). Agregat dengan gradasi rapat akan menghasilkan lapis perkerasan dengan stabilitas tinggi, kurang kedap air, sifat drainase jelek dan berat volume besar. Agregat dinamakan bergradasi baik bila persen yang lolos setiap lapis dari sebuah gradasi memenuhi :

$$P = 100 (d/D)^{0,45} \quad (2-1)$$

Dimana :

P = persen lolos saringan dengan ukuran bukaan d mm.

d = ukuran agregat yang sedang diperhitungkan.

D = ukuran maksimum partikel dalam gradasi tersebut.

Gradasi agregat merupakan campuran dari berbagai diameter butiran agregat yang membentuk susunan campuran tertentu. Gradasi agregat ini diperoleh dari hasil analisa saringan dengan menggunakan 1 set saringan (dengan ukuran saringan 19,1 mm; 12,7 mm; 9,52 mm; 4,76 mm; 2,38 mm; 1,18 mm; 0,59 mm; 0,149 mm; 0,074 mm), dimana saringan yang paling kasar diletakkan di atas dan yang paling halus terletak paling bawah. Satu saringan dimulai dari PAN dan diakhiri dengan tutupnya (Sukirman, 1999). Penelitian yang dilakukan menggunakan gradasi dengan nomor campuran 3 dikarenakan gradasi ini memiliki tingkat gradasi yang rapat dan dapat digunakan untuk lapisan permukaan jalan pada perkerasan jalan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.6. Gradasi agregat di bawah ini:

Tabel 2.6. Gradasi Agregat

| Ukuran Ayakan (mm) | % Berat Yang Lolos terhadap Total Agregat dalam Campuran | | | | | | | | |
|--------------------|--|----------|-----------------|----------|----------------------|----------|---------------|----------|---------|
| | Latasir (SS) | | Lataston (HRS) | | | | Laston (AC) | | |
| | | | Gradasi Senjang | | Gradasi Semi Senjang | | Gradasi Halus | | |
| | Kelas A | Kelas B | WC | Base | WC | Base | WC | BC | Base |
| 37,5 | | | | | | | | | 100 |
| 25 | | | | | | | | 100 | 90-100 |
| 19 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 90 - 100 | 76 - 90 |
| 12,5 | | | 90 - 100 | 90 - 100 | 87 - 100 | 90 - 100 | 90 - 100 | 75 - 90 | 60 - 78 |
| 9,5 | 90 - 100 | | 75 - 85 | 65 - 90 | 55 - 88 | 55 - 70 | 77 - 90 | 66 - 82 | 52 - 71 |
| 4,75 | | | | | | | 53 - 69 | 46 - 64 | 35 - 54 |
| 2,36 | | 75 - 100 | 50 - 72 | 35 - 55 | 50 - 62 | 32 - 44 | 33 - 53 | 30 - 49 | 23 - 41 |
| 1,18 | | | | | | | 21 - 40 | 18 - 38 | 13 - 30 |
| 0,600 | | | 35 - 60 | 15 - 35 | 20 - 45 | 15 - 35 | 14 - 30 | 12 - 28 | 10 - 22 |
| 0,300 | | | | | 15 - 35 | 5 - 35 | 9 - 22 | 7 - 20 | 6 - 15 |
| 0,150 | | | | | | | 6 - 15 | 5 - 13 | 4 - 10 |
| 0,075 | 10 - 15 | 8 - 13 | 6 - 10 | 2 - 9 | 6 - 10 | 4 - 8 | 4 - 9 | 4 - 8 | 3 - 7 |

(Sumber : Kementerian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

2.2.3 Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi (*filler*) dapat berupa debu batu kapur, semen *portland*, abu terbang, abu tanur semen atau material non plastis lainnya (Sukirman, 2003). Bahan pengisi yang ditambahkan harus kering dan bebas dari gumpalan-gumpalan dan bila diuji dengan pengayakan sesuai SNI 03-4142-1996 harus mengandung bahan yang lolos ayakan No.200 (0,075mm) tidak kurang dari 75% dari yang lolos ayakan No. 30 (0,600mm) dan mempunyai sifat non plastis. Fungsi dari bahan pengisi (*filler*) untuk memodifikasi agregat halus sehingga berat jenis campuran meningkat dan jumlah aspal yang diperlukan untuk mengisi rongga akan berkurang (Suprpto, 2004).

Dalam penelitian ini bahan pengisi yang digunakan adalah *fly ash*. *Fly ash* batubara adalah limbah industri yang dihasilkan dari pembakaran batubara dan terdiri dari partikel yang halus. Gradasi dan kehalusan *fly ash* batubara dapat memenuhi persyaratan gradasi AASTHO M17 untuk mineral *filler*. Secara kimia abu batubara (*fly ash*) merupakan mineral *alumino silica* yang mengandung unsur-unsur Ca, K, dan Na di samping juga mengandung sejumlah kecil unsur C dan N tersusun dari partikel berukuran kecil yang mempunyai karakteristik kapasitas pengikatan air dari sedang sampai tinggi, dan juga sifat-sifat pembentuk seperti semen (Nugroho, 2010). Abu terbang batu bara dapat dijadikan sebagai mineral *filler* karena ukuran partikelnya yang sangat halus, dan dari beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya, abu terbang batubara mengandung unsur *pozzolan*,

sehingga dapat berfungsi sebagai bahan pengisi rongga dan pengikat beton aspal dan untuk meningkatkan stabilitas dari campuran beton aspal lapisan aus (AC-WC) (Tahir, 2009). Komponen utama dari abu terbang batubara yang berasal dari pembangkit listrik adalah silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), kalsium (CaO) dan sisanya adalah magnesium, potasium, sodium, titanium dan belerang dalam jumlah yang sedikit (Mia, 2011). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.7:

Tabel 2.7. Komposisi Kimia Abu Terbang Batubara

| Komponen | Bituminous | Sub-bituminous | Lignite |
|-------------------------|------------|----------------|---------|
| SiO_2 | 20-60% | 40-60% | 15-45% |
| Al_2O_3 | 5-35% | 20-30% | 10-25% |
| Fe_2O_3 | 10-40% | 4-10% | 4-15% |
| CaO | 1-12% | 5-30% | 15-40% |
| MgO | 0-5% | 1-6% | 3-10% |
| SO_3 | 0-4% | 0-2% | 0-10% |
| Na_2O | 0-4% | 0-2% | 0-6% |
| K_2O | 0-3% | 0-4% | 0-4% |
| LOI | 0-15% | 0-3% | 0-5% |

(Sumber: Mia, 2011)

Menurut Mia (2011) sifat kimia dari abu terbang batubara dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar dan teknik penyimpanan serta penanganannya. Pembakaran batubara *lignite* dan *sub-bituminous* menghasilkan abu terbang dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak dari pada jenis *bituminous*. Namun, memiliki kandungan silika, alumina, dan karbon yang lebih sedikit dari pada *bituminous*. Menurut Nugroho (2010) sebagian besar komposisi kimia dari abu terbang tergantung tipe batubara, terdapat dua jenis abu terbang yaitu kelas F dan C. kelas F dihasilkan dari pembakaran batubara jenis *bituminous*, sedangkan kelas C dari batubara jenis *lignite* dan *sub-bituminous*. Kelas C memiliki kadar kapur tinggi.

Menurut Mia (2011) kandungan karbon dalam abu terbang diukur dengan menggunakan *Loss Of Ignition Method* (LOI), yaitu suatu keadaan hilangnya potensi nyala dari abu terbang batubara. Abu terbang batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel abu terbang hasil pembakaran batubara *bituminous* lebih kecil dari 0,075 mm. Kerapatan abu terbang berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m^3 dan luas area spesifiknya (diukur berdasarkan metode

permeabilitas udara *Blaine*) antara 170 sampai 1000 m²/kg, sedangkan ukuran partikel rata-rata abu terbang batubara jenis *sub-bituminous* 0,01mm – 0,015 mm, luas permukaannya 1-2 m²/g, massa jenis (*specific gravity*) 2,2 – 2,4 dan bentuk partikel sebagian besar berbentuk seperti bola.

Menurut Wardani (2008) *fly ash* kelas F dan kelas C keduanya dapat digunakan sebagai mineral *filler* untuk pengisi *void* dan memberikan kontak *point* antara partikel agregat yang lebih besar pada campuran *aspalt concrete*. Aplikasi ini digunakan sebagai pengganti *portland cement* atau *hydrated lime*. Untuk penggunaan perkerasan aspal. Sifat *hydrophobic* dari *fly ash* memberikan daya tahan yang lebih baik untuk perkerasan dan tahan terhadap *stripping*. *Fly ash* juga dapat meningkatkan *stiffness* dari *matrix asfalt*, meningkatkan daya tahan terhadap *rutting* dan meningkatkan *durability* campuran.

Menurut Tahir (2009) menyebutkan bahwa berdasarkan hasil pemeriksaan dan analisis karakteristik campuran beton aspal lapisan aus (AC-WC) dengan menggunakan variasi kadar *filler* abu terbang batu bara menunjukkan adanya peningkatan kinerja campuran beton aspal yang terkait dalam peningkatan nilai stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas. Peningkatan ini terjadi seiring dengan penambahan kadar *filler* abu terbang batu bara yang digunakan pada campuran beton aspal dalam benda uji penelitian.

2.3 Karakteristik Campuran Beton Aspal (Parameter Marshall)

Karakteristik campuran panas agregat aspal dapat diukur dari sifat-sifat *marshall* yang ditunjukkan pada nilai-nilai sebagai berikut (Sukirman, 2003):

2.3.1 *Void in Mixture (VIM)*

Void in Mixture (VIM) merupakan persentase rongga yang terdapat dalam total campuran. Nilai *VIM* berpengaruh terhadap keawetan lapis perkerasan, semakin tinggi nilai *VIM* menunjukkan semakin besar rongga dalam campuran sehingga campuran bersifat *porous*. Hal ini mengakibatkan campuran menjadi kurang rapat sehingga air dan udara mudah memasuki rongga-rongga dalam campuran yang menyebabkan aspal mudah teroksidasi sehingga menyebabkan lekatan antar butiran agregat berkurang sehingga terjadi pelepasan butiran (*revelling*) dan pengelupasan permukaan (*stripping*) pada lapis perkerasan. Volume rongga udara dalam campuran dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$VIM = 100 - \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (2-2)$$

Keterangan:

VIM : Rongga udara pada campuran setelah pemadatan, presentase dari volume total (%)

Gmb : Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)

Gmm: Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (gr/cc)

Nilai *VIM* yang terlalu rendah akan menyebabkan *bleeding* karena *temperatur* yang tinggi, maka viskositas aspal menurun sesuai sifat termoplastisnya. Pada saat itu apabila lapis perkerasan menerima beban lalu lintas maka aspal akan terdesak keluar permukaan karena tidak cukupnya rongga bagi aspal untuk melakukan penetrasi dalam lapis perkerasan. Nilai *VIM* yang lebih dari ketentuan akan mengakibatkan berkurangnya keawetan lapis perkerasan, karena rongga yang terlalu besar akan mudah terjadi oksidasi.

2.3.2 Void in Mineral Aggregate (VMA)

Void In Mineral Aggregate (VMA) adalah rongga udara antar butir agregat aspal padat, termasuk rongga udara dan kadar aspal efektif yang dinyatakan dalam persen terhadap total volume. Kuantitas rongga udara pengaruh terhadap kinerja suatu campuran karena jika *VMA* terlalu kecil maka campuran bisa mengalami masalah durabilitas dan jika *VMA* terlalu besar maka campuran bisa memperlihatkan masalah stabilitas dan tidak ekonomis untuk diproduksi. *VMA* dapat dihitung pula terhadap berat campuran total atau terhadap berat agregat total. Perhitungan *VMA* terhadap campuran adalah dengan rumus berikut :

- a) Terhadap berat agregat total

$$VMA = 100 - \left(\frac{Gmb - Ps}{Gsb} \right) \quad (2-3)$$

Keterangan:

VMA : Rongga udara pada mineral agregat, presentase dari volume total (%)

Gmb : Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)

Gsb : Berat jenis *bulk* agregat (gr/cc)

Ps : Kadar agregat, persen terhadap berat total campuran (%)

- b) Terhadap berat campuran total

$$VMA = 100 - \left(\frac{Gmb}{Gsb} \times \frac{100}{100 + Pb} \times 100 \right) \quad (2-4)$$

Keterangan:

VMA : Rongga udara pada mineral agregat, presentase dari volume total (%)

Gmb : Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)

Gsb : Berat jenis *bulk* agregat (gr/cc)

Pb : Kadar aspal, persen total campuran (%)

Nilai *VMA* dipengaruhi oleh faktor pemadatan, yaitu jumlah dan temperatur pemadatan, gradasi agregat dan kadar aspal. Nilai *VMA* ini berpengaruh pada sifat kekedapan campuran terhadap air dan udara serta sifat elastis campuran. Dapat juga dikatakan bahwa nilai *VMA* menentukan stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas. Nilai *VMA* yang disyaratkan adalah minimum 15 %.

2.3.3 Stabilitas

Stabilitas (kekuatan) merupakan kemampuan lapis keras untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya tanpa mengalami perubahan bentuk tetap seperti gelombang (*wash boarding*) dan alur (*rutting*). Nilai stabilitas dipengaruhi oleh bentuk, kualitas, tekstur permukaan dan gradasi agregat yaitu gesekan antar butiran agregat (*internal friction*) dan penguncian antar agregat (*interlocking*), daya lekat (*cohesion*) dan kadar aspal dalam campuran. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai stabilitas lapis perkerasan adalah:

1. Gesekan internal yang terjadi karena kekasaran permukaan butir-butir agregat, luas bidang kontak antar butir atau bentuk butir, gradasi agregat, kepadatan campuran dan tebal film aspal.
2. Kohesi yang merupakan gaya ikat aspal yang berasal dari daya lekatnya sehingga mampu memelihara tekanan kontak antar butir agregat.

Penggunaan aspal dalam campuran akan menentukan nilai stabilitas campuran tersebut. Seiring dengan penambahan aspal, nilai stabilitas akan meningkat hingga batas maksimum. Penambahan aspal di atas batas maksimum justru akan menurunkan stabilitas campuran itu sendiri sehingga lapis perkerasan menjadi kaku dan bersifat getas. Nilai stabilitas berpengaruh pada fleksibilitas lapis perkerasan yang dihasilkan. Nilai stabilitas yang disyaratkan adalah lebih dari 800 kg. Lapis perkerasan dengan stabilitas kurang dari 800 kg akan mudah mengalami *rutting*, karena perkerasan bersifat lembek sehingga kurang mampu mendukung beban. Sebaliknya jika stabilitas perkerasan terlalu tinggi maka perkerasan akan mudah retak karena sifat perkerasan menjadi kaku.

2.3.4 Flow

Flow (kelelehan) adalah besarnya deformasi vertikal benda uji yang terjadi pada awal pembebanan sehingga stabilitas menurun, yang menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada lapis perkerasan akibat menahan beban yang diterimanya. Deformasi yang terjadi erat kaitannya dengan sifat-sifat *marshall* yang lain seperti stabilitas, *VIM* dan *VFA*. Nilai *VIM* yang besar menyebabkan berkurangnya *interlocking resistance* campuran dan dapat berakibat timbulnya deformasi.

Nilai *VFA* yang berlebihan juga menyebabkan aspal dalam campuran berubah konsistensinya menjadi pelicin antar batuan. Nilai *flow* dipengaruhi oleh kadar dan viskositas aspal, gradasi agregat jumlah dan temperatur pemadatan.

Campuran yang memiliki angka kelelahan rendah dengan stabilitas tinggi cenderung menjadi kaku dan getas. Sedangkan campuran yang memiliki angka kelelahan tinggi dan stabilitas rendah cenderung plastis dan mudah berubah bentuk apabila mendapat beban lalu lintas. Kerapatan campuran yang baik, kadar aspal yang cukup dan stabilitas yang baik akan memberikan pengaruh penurunan nilai *flow*. Nilai *flow* yang rendah akan mengakibatkan campuran menjadi kaku sehingga lapis perkerasan menjadi mudah retak, sedangkan campuran dengan nilai *flow* tinggi akan menghasilkan lapis perkerasan yang plastis sehingga perkerasan akan mudah mengalami perubahan bentuk seperti gelombang dan alur (*rutting*).

2.3.5 Marshall Quotient

Hasil bagi *marshall* (*marshall quotient*) merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan *flow*. Nilai *marshall quotient* akan memberikan nilai fleksibilitas campuran. Semakin besar nilai *marshall quotient* berarti campuran semakin kaku, sebaliknya bila semakin kecil nilainya maka campuran semakin lentur. Nilai *marshall quotient* dipengaruhi oleh stabilitas dan *flow*. Nilai *marshall quotient* yang disyaratkan minimal 200 kg/mm. Nilai *marshall quotient* di bawah 200 kg/mm mengakibatkan perkerasan menjadi bergelombang, *rutting* dan *bleeding*. Sifat *marshall quotient* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$MQ = \frac{MS}{MF} \quad (2-5)$$

Keterangan :

MQ : *Marshall Quotient* (MQ) (kg/mm) MF : *Marshall Flow* (mm)

MS : *Marshall Stability* (kg)

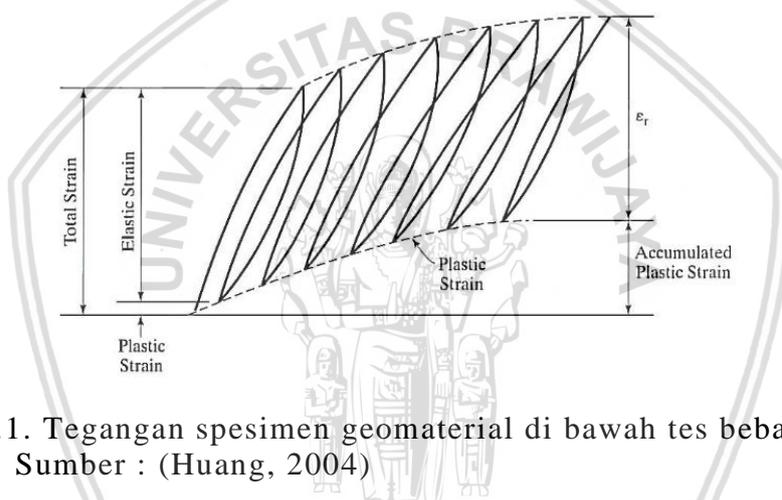
2.4 Konsep Elastisitas Bitumen (Parameter Modulus Resilien)

Konsep modulus resilien (M) pada awalnya diperkenalkan oleh Seed dkk (1962) untuk mengkarakterisasi respon elastis tanah dasar di perkerasan lentur. Karena keandalannya dalam pengukuran dan penerapan, respon modulus ketahanan bahan granular yang tidak terikat digunakan dalam panduan desain American Association of State Highway dan Transportation Officials (AASHTO) untuk struktur perkerasan (AASHTO, 1993). Tes kompresi Triaxial beban ASHTO T307 saat ini merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengukur karakteristik deformasi resilien (elastis) geomaterial di

laboratorium (AASHTO, 2005). Di bawah penerapan berulang beban dinamis, strain yang dapat dipulihkan digunakan untuk mengevaluasi sifat tahanan dari geomaterial perkerasan. Gambar 2.1. menunjukkan tegangan yang dicatat di bawah tes beban berulang untuk geomaterial perkerasan. Dapat dilihat bahwa baik deformasi elastis dan plastik terjadi pada tahap awal aplikasi beban. Seiring bertambahnya jumlah aplikasi beban, jumlah deformasi plastik menurun sampai tahap dimana deformasi hampir dapat dipulihkan. Pada tahap itu, modulus resilien diperoleh berdasarkan regangan aksial yang dapat dipulihkan pada beban dinamik yang diterapkan. Modulus resilien ditentukan oleh

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Dimana σ_d adalah tegangan deviator dinamis dan ϵ_r adalah regangan aksial resilien (deformasi balik).

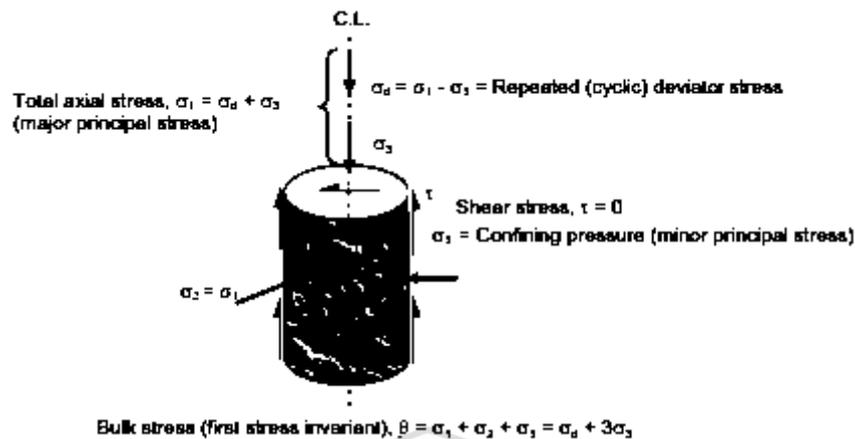


Gambar 2.1. Tegangan spesimen geomaterial di bawah tes beban berulang
Sumber : (Huang, 2004)

Prinsip pengujian triaksial siklis yang digunakan dalam praktik rekayasa geoteknik klasik telah diperluas ke bidang rekayasa perkerasan untuk melakukan uji modulus resilien yang mensimulasikan jalan raya atau jenis pemuatan bandara. Perbedaan utama adalah bahwa pada uji modulus resilien, beban transien yang jauh di bawah tegangan kegagalan untuk material tersebut biasanya diterapkan pada sampel bahan perkerasan.

Kondisi tegangan yang diterapkan pada spesimen untuk pengukuran langsung tegangan utama dan tegangan adalah uji triaksial silinder. Gambar 2.2. mengilustrasikan komponen tegangan yang digunakan dalam pengujian pemuatan berulang untuk menentukan modulus lentur dari geomaterial perkerasan. Tegangan aksial total (σ_1), terdiri dari tegangan penyimpangan dinamis (σ_d) dan tegangan pengikat statis atau tekanan pengekangan (σ_3). Tekanan pengekangan hanya terdiri dari komponen tegangan statis ($\sigma_2 = \sigma_3$) dan komponen tegangan dinamis nol pada arah horisontal. Baik penyimpangan stres dan pengekangan. Tekanan memiliki pengaruh yang besar terhadap perilaku ulah lapisan

geomaterial di trotoar. Perhatikan bahwa tegangan geser (τ) pada bidang sampel selama pengujian adalah nol.



Gambar 2.2. Konsep Tegangan Untuk Pengujian Modulus Resilien

Pengujian modulus resilien dilakukan pada tekanan pengekanan yang berbeda dan keadaan tegangan deviatorik dalam upaya untuk mensimulasikan pembebanan jalan raya yang khas pada kendaraan yang berbeda pada kedalaman yang berbeda dalam struktur perkerasan. Selama pengujian, spesimen silinder dikenai tekanan berulang yang berbeda / berdenyut dengan tekanan konstan yang berbeda untuk mensimulasikan tegangan lateral yang disebabkan oleh tekanan overburden dan beban roda yang diaplikasikan secara dinamis. Dalam prosedur AASHTO T307, pulsa beban haversine dengan pemuatan 0,1 detik dan periode istirahat 0,9 detik umumnya diterapkan pada spesimen untuk 100 siklus beban dengan minimal 500 siklus beban tahap pengkondisian. Dengan demikian, durasi total untuk satu siklus beban adalah 1 detik (60 aplikasi beban per menit). Untuk bahan lantai bawah, laporan NCHRP Project 1-28A, "Metode uji yang disoneterisasi untuk penentuan laboratorium modulus ketahanan untuk desain perkerasan lentur," menentukan denyut nadi berkapasitas 0,2 detik dan waktu istirahat 0,8 detik (Witczak, 2004). Respons deformasi aksial total spesimen dan tegangan deviator yang diterapkan diukur dan digunakan untuk hitung modulus resilien.

Untuk menghindari kegagalan sampel uji pada awal program pengujian, beberapa lembaga dan peneliti merekomendasikan agar aplikasi beban harus dimulai pada tekanan pengikat tertinggi dengan tegangan aksial yang sesuai pada tingkat terendah. Ini akan memastikan bahwa keadaan tegangan dimana material paling tidak mungkin gagal dipilih terlebih dahulu, diikuti oleh keadaan tegangan dimana sampel cenderung gagal. Pendekatan ini biasanya diadopsi untuk tanah halus. Pendekatan alternatif adalah untuk menentukan kekuatan geser (lingkaran Mohr) material dengan menggunakan uji statik

pada kisaran tekanan yang membatasi sebelum pengujian beban berulang dan gunakan ini sebagai dasar untuk mendefinisikan rezim s tegangan res yang akan digunakan untuk pengujian dinamis.

Teori elastisitas biasanya digunakan untuk desain perkerasan lentur. Teori ini mengasumsikan bahwa semua bahan di perkerasan bersifat homogen, isotropik, dan elastis secara linier. Dengan asumsi ini, hanya dua sifat material, yaitu rasio Poisson dan modulus elastisitas yang diperlukan untuk menghitung tegangan, regangan, dan defleksi pada lapisan perkerasan. Rasio Poisson biasanya diasumsikan atau diperoleh melalui penggunaan korelasi, dan modulus resilien digunakan sebagai modulus elastisitas berdasarkan tegangan yang dapat dipulihkan pada beban berulang. Dalam Desain perkerasan lentur mekanistik-empiris, nilai modulus resilien yang ditentukan di laboratorium lebih disukai, walaupun pengukuran lapangan melalui prosedur backcalculation dari data Falling Weight Deflectometer (FWD) dapat diterima.

Sejak 1986, AASHTO telah memasukkan modulus resilien dari material lapisan perkerasan ke dalam proses perancangan dan analisisnya. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, panduan desain NCHRP dan SAPDM, dan pendekatan analisis perkerasan dan desain fleksibel berbasis mekanistik lainnya menggunakan modulus resilien untuk mengkarakterisasi lapisan tak terikat pada sistem perkerasan (NCHRP, 2004; SANRAL, 2008). Dalam panduan desain ini, nilai modulus resilien geomaterial yang ditentukan dari laboratorium terutama digunakan untuk analisis perkerasan baru, rekonstruksi dan rehabilitasi, sedangkan nilai modulus ketahanan yang diperoleh dari perhitungan balik FWD dapat digunakan untuk analisis rekonstruksi dan perawatan pada perkerasan jalan.

Perilaku resilien geomaterial di perkerasan lentur dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk besarnya tingkat tegangan, riwayat tegangan, jumlah aplikasi beban dan urutan pengkondisian. Sifat geomaterial lainnya seperti batas cair, indeks plastisitas, distribusi ukuran partikel, berat jenis, kadar air, kerapatan dan kandungan karbon organik juga dikaitkan dengan modulus tanah yang lentur (Bejarano & Thompson 1999). Tekanan yang diterapkan, kepadatan padat dan kandungan kelembaban spesimen berpengaruh secara signifikan terhadap perilaku resilien tanah halus. Namun, beberapa penulis telah menunjukkan bahwa respon geomaterial yang resilien dapat dicirikan secara wajar dengan menggunakan model tegangan tergantung yang menyatakan modulus semata-mata sebagai fungsi daya nonlinier dari keadaan tegangan yang diterapkan (Hicks & Monismith, 1971; Uzan, 1985; Witczak & Uzan, 1992).

Beberapa model konstitutif tergantung tegangan tersedia untuk menentukan hubungan sensitif tegangan antara nilai modulus resilien dan berbagai keadaan stres. Untuk input parameter level 1 pada panduan desain AASHTO 2002, hubungan berikut menggambarkan ketergantungan tegangan dari kedua tanah berbutir halus dan material tak terikat untuk analisis dan desain mekanis (NCHRP 1-37A, 2004).

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (2-6)$$

Dimana,

θ = bulk stress = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$;

σ_1 = major principal stress;

σ_2 = σ_3 for triaxial test on cylindrical specimen;

σ_3 = minor principal stress or confining stress in the triaxial cell;

τ_{oct} = octahedral shear stress;

$$= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ for cylindrical specimen in triaxial test;}$$

P_a = normalizing stress atmospheric pressure = 101.3 kPa;

k_1, k_2, k_3 = model parameters obtained from regression analyses.

Parameter model k_1, k_2 , dan k_3 diperoleh dengan menggunakan teknik regresi non linier agar sesuai dengan data uji modulus resapan yang dihasilkan di laboratorium dan berhubungan dengan sifat material.

Mohammad dkk. (1994) juga melaporkan bahwa sampai batas tertentu, nilai parameter model ini bergantung pada sistem pengukuran dan prosedur pengujian.

Dalam persamaan konstitutif ini, koefisien yang mewakili parameter model k_1 sebanding dengan modulus resilien. Nilai k_2 dari istilah tegangan curah harus positif karena modulus resilien tidak akan pernah negatif. Juga, meningkatkan tekanan curah harus menghasilkan kekakuan material, yang menghasilkan modulus lentur yang lebih tinggi. Namun, parameter k_3 , yang merupakan eksponen tekanan oktahedral, harus negatif karena meningkatkan tegangan geser menurunkan nilai modulus resapan atau menghasilkan pelunakan bahan.

Modulus resilien juga dapat diperkirakan dari sifat kekuatan material lainnya termasuk nilai Bearing Ratio California (Rutan) California dan Rasio Hveem Resistance (R) yang umum digunakan. Penggunaan nilai CBR dan R lebih empiris, dan hanya boleh digunakan

dalam batas-batas kondisi pengujian yang menjadi dasar pengujian. Persamaan 3 dan 4 mewakili modulus resistansi-CBR, dan korelasi nilai resistansi modulus resilien yang direkomendasikan dalam panduan desain NCHRP 1-37A untuk analisis dan desain perkerasan lentur.

$$M_R(MPa) = 17,6 CBR^{0,64} \quad (2-7)$$

$$M_R(MPa) = 8,0 + 3,8 R \quad (2-8)$$

Untuk mendefinisikan sifat-sifat elastis Yoder dan Witczak (1975) memperkenalkan konsep modulus kekakuan sebagai parameter dasar untuk menjelaskan sifat-sifat mekanik aspal, dengan analogi modulus elastis benda padat. Jika tegangan tarik σ , bekerja pada bahan dengan regangan ϵ , maka modulus elastisitas E, dari suatu bahan dinyatakan dengan hukum Hook adalah :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-9)$$

Pada kasus bahan *viscoelastis*, seperti bitumen, tegangan tarik σ , yang bekerja pada waktu pembebanan t, menyebabkan regangan ϵ . Modulus kekakuan S_t , pada waktu pembebanan t, didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang bekerja dan regangan pada waktu pembebanan t :

$$S_t = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-10)$$

Selanjutnya karena modulus elastisitas bitumen juga tergantung oleh temperatur T, konsekuensinya perlu untuk menyatakan kedua faktor waktu pembebanan dan temperatur ke dalam perhitungan modulus kekakuan :

$$S_{t,T} = \frac{\sigma}{\epsilon.T} \quad (2-11)$$

2.4.1 Estimasi Modulus Kekakuan Campuran Aspal

Dari hasil penelitian Yoder dan Witczak tahun 1975 disimpulkan bahwa kekakuan campuran aspal (S_m) sangat dipengaruhi oleh kekakuan aspal (S_b) dan konsentrasi volume agregat (C_v). Konsentrasi volume agregat (C_v) didefinisikan sebagai berikut :

$$C_v = \frac{\text{Volume agregat}}{\text{Vol.agregat} + \text{Vol.aspal}} \quad (2-12)$$

$$= \frac{Ma/Ga}{\left(\frac{Ma}{Ga}\right) + \left(\frac{Mb}{Gb}\right)}$$

Keterangan:

C_v = konsentrasi volume agregat

Ma = persentase berat agregat

Mb = persentase bahan pengikat

G = *Specific gravity* agregat

G_b = *Specific gravity* aspal

Kekakuan campuran aspal selanjutnya dihitung sebagai berikut (Yoder&Witczak,1975):

$$S_m = \left[1 + \left(\frac{2,5}{n} \right) \left(\frac{C_v}{1-C_v} \right) \right] \quad (2-13)$$

$$N = 0,83 \log \left(\frac{4 \times 10^5}{S_b} \right) \quad (2-14)$$

Keterangan:

S_m = Modulus kekakuan campuran aspal

S_b = Modulus kekakuan aspal

Persamaan kekakuan campuran aspal di atas berlaku untuk kadar rongga udara sekitar 3 dan nilai C_v antara 0,7 dan 0,9. Untuk rongga udara lebih dari 3 %, Yoder & Witczak (1975) merekomendasikan menggunakan C_v' seperti dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_v' = \frac{C_v}{1-(V_v-0,03)} \quad (2-15)$$

Keterangan:

C_v' = konsentrasi volume agregat yang telah dimodifikasi

V_v = volume rongga udara dalam campuran

Bazin, P. dan Saunier, J. (1994) mengatakan bahwa yang mempengaruhi modulus campuran beton aspal adalah waktu pembebanan, temperatur, jenis aspal yang digunakan dan kadar rongga udara dalam campuran. Hasil penelitian Sudjatmiko (1999) di Jakarta menunjukkan bahwa nilai *Mean Monthly Air Temperature (MMAT)* 27,6°C dapat digunakan sebagai temperatur referensi bagi desain struktur perkerasan aspal di area Jakarta. Jika nilai *MMAT* 27,6°C tersebut digunakan sebagai temperature referensi, maka nilai modulus efektif sebesar 1.807 Mpa dapat digunakan dalam analisis struktur perkerasan aspal. Haryanto dkk (2003) telah menguji modulus kekakuan campuran aspal dengan alat *UMATTA* terhadap 40 sampel dengan kadar aspal 6,5%. Penelitian dilakukan dengan temperature perkerasan 25°C, 37,5°C dan 50°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Penambahan temperatur perkerasan diiringi dengan pengurangan modulus kekakuan.
2. Modulus kekakuan campuran aspal bervariasi sesuai dengan periode pembebanan dan temperaturnya.

2.5 Teknik Pengujian Data

Prosedur penentuan apakah dua buah populasi memiliki rata-rata yang sama atau tidak telah di bahas di dalam pembahasan tentang hipotesis uji-t. Tetapi, sering terjadi bahwa masalah – masalah manajemen yang timbul adalah lebih dari dua populasi, sedangkan pembuat keputusan ingin mengetahui apakah rata – rata dari populasi – populasi itu sama atau tidak. Dalam menganalisis data lebih dari dua populasi tidak dianjurkan melakukan uji-t berulang-ulang sehingga dapat meningkatkan nilai α (taraf signifikansi), artinya akan meningkatkan peluang mendapatkan hasil yang keliru.

Permasalahan – permasalahan ini tentunya dapat dipecahkan, yaitu dengan menggunakan sebuah teknik penting yang dikenal sebagai *Analysis of variance* atau yang sering disingkat ANOVA. Uji ini dapat digunakan untuk menganalisis perbedaan lebih dari dua populasi kelompok *independent*. Teknik ANOVA ini dikembangkan oleh *Ronald A. Fisher*, dengan memanfaatkan distribusi F. Teknik ini sering dipakai untuk penelitian terutama pada rancangan penelitian yang memiliki implikasi pengambilan keputusan untuk menggunakan teknologi baru, prosedur – prosedur baru, ataupun kebijakan – kebijakan baru.

Pengujian ini disebut analisis varian karena didalam pembentuknya, kita menentukan apakah menerima atau menolak hipotesisnya mengenai rata – rata populasi yang berarti sama dengan kita menganalisis variasi (varian) didalam rata – rata cuplikan. ANOVA dibentuk atas dasar cuplikan – cuplikan acak sederhana yang ditarik secara bebas, disebarkan secara normal dan memiliki varian – varian yang sama.

Menurut *Mendenhall*, prosedur analisis varian bertujuan menganalisis variasi dari sebuah response dan untuk menentukan bagian daripada variasi ini bagi setiap kelompok variabel bebas. Pemikiran dibelakang prosedur itu adalah bahwa variabel – variabel bebas jawaban berbeda – beda semata – mata dikarekan oleh suatu variasi di dalam kelompok variabel bebas yang diketahui. Hal itu berarti, tujuan daripada analisis varian adalah untuk menempatkan variabel – variabel bebas penting didalam suatu studi dan untuk menentukan bagaimana mereka berinteraksi dan saling mempengaruhi (*Mendenhall, & Reinmuth, 1982; hlm 542*).

ANOVA atau yang sering disebut juga uji-F pada prinsipnya yang dipakai dalam pengujian hipotesis ini adalah apabila mean dari kelompok bagian sangat berbeda maka variansi kombinasi dari seluruh kelompok jauh lebih besar dari variansi masing – masing kelompok bagian.

Asumsi pengujian ANOVA yaitu populasi yang akan diuji berdistribusi normal, keseragaman varian/ragam populasi yang akan diuji, dan antara satu sampel dengan sampel yang lain tidak memiliki keterkaitan.



2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang berkaitan “Penggunaan *Fly Ash* Sebagai *Filler* Terhadap Modulus Resilien Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC)” telah dilakukan sebelumnya tetapi dengan variasi yang beragam. Dari penelitian-penelitian tersebut telah dihasilkan berbagai kesimpulan sesuai dengan tujuannya.

Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu

| NO | JURNAL DARI | VARIABEL | | | KESIMPULAN | RENCANA VARIABEL YANG DIGUNAKAN |
|----|--|--|--|---|---|--|
| | | AGREGAT | ASPAL | TEMPERATUR PENGUJIAN | | |
| 1 | Hilal Haitamy dan Neny Noviyati Fendi. 2007. <u><i>Penggantian Kadar Abu Batubara Sebagai Filler Dan Variasi Temperatur Pematatan Terhadap Karakteristik Dan Indeks Kekuatan Sisa (IKS) Campuran Aspal Beton (LASTON)</i></u> . Universitas Brawijaya Malang | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston (75x tumbukan) 3/4”, 1/2”, 3/8”, No. 8, No. 30, No 50, No. 200 | Aspal Pen 60/70 dengan KAO sebesar 6,222% (Caroline 1996) | 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C. | Kombinasi kadar abu batubara serta temperatur optimum berpengaruh terhadap karakteristik marshall. VIM (> 34,98%), VMA (> 8,27%), Stabilitas (> 0,53%), Flow (> 11,41%). Dari hasil penelitian didapatkan kadar abu batubara optimum sebesar 5/5% dan temperatur optimum sebesar 128 °C | Agregat yang digunakan yaitu untuk campuran laston dengan spesifikasi untuk lalu lintas berat. <i>Filler fly ash</i> yang digunakan yaitu 5/5% karena pada kadar tersebut nilai VIM memiliki nilai yang optimum. |
| 2 | Tahir, Anas dan Arief, Setiawan. 2009. <u><i>Kinerja Durabilitas Campuran Beton Aspal Ditinjau Dari Faktor Variasi Temperatur Pematatan Dan Lama Perendaman</i></u> | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston. Lama perendaman (1, 2, 4, 6, 8 hari) | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal Pen 60/70. (5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0%.) | 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, | Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa Durabilitas tertinggi dicapai pada temperatur pematatan 120 °C dengan lama rendaman satu hari. Indeks Penurunan Stabilitas tertinggi terjadi pada temperatur pematatan 120°C. | Kadar aspal optimum yang didapat yaitu kadar aspal 5,25%. |

(Sumber: Arsip Pribadi)

Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

| NO | JURNAL DARI | VARIABEL | | | KESIMPULAN | RENCANA VARIABEL YANG DIGUNAKAN |
|----|---|---|--|----------------------|--|---|
| | | AGREGAT | ASPAL | TEMPERATUR PENGUJIAN | | |
| 3 | Tahir, Anas. 2009. <u>Karakteristik Campuran Beton Aspal (AC-WC) Dengan Menggunakan Variasi Kadar Filler Abu Terbang Batu Bara.</u> Universitas Tadulako, Palu | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston (AC-WC). Filler fly ash (4%, 5%, 6%, 7%, 8%) | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal Pen 60/70. (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0%,) | Tidak Dibahas | Hasil penelitian menunjukkan semakin banyak filler abu terbang batu bara yang digunakan, menyebabkan nilai stabilitas, fleksibilitas, durabilitas semakin meningkat. Tetapi pada kadar 4% dan 5% nilai VIM berada di luar batas spesifikasi (3,5%-5,5%) yaitu 7.262% dan 2.945% | Filler fly yang digunakan yaitu 6%, 7%, 8% karena pada kadar tersebut nilai VIM memenuhi syarat spesifikasi. Kadar aspal optimum yang didapat yaitu kadar aspal 5,5%. |
| 4 | Ambarwati, Lasmini dkk. 2009. <u>Pengaruh Kadar Abu Batubara Sebagai Filler Terhadap Karakteristik Dan Indeks Kekuatan Sisa (IKS) Pada Campuran Hot Rolled Sheet (HRS)</u> Universitas Brawijaya Malang | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Hot Rolled Sheet (HRS). Filler fly ash (0%, 2%, 4%, 6%, 8%) Lama perendaman (30 menit, 24 jam) | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal Pen 60/70. (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0%,) | Tidak Dibahas | Berdasarkan hasil analisis perendaman, menunjukkan bahwa semakin bertambah jumlah kadar abu batubara, pada nilai VIM dan VMA cenderung meningkat, pada nilai Stabilitas, Flow, dan MQ mengalami penurunan, dan nilai IKS pada campuran cenderung meningkat sampai nilai maksimum (kadar 4%) dan kembali turun sampai nilai minimum (kadar 8%). | Filler fly yang digunakan yaitu 4%, 6%, 8% karena pada kadar tersebut nilai VIM dan VMA memenuhi syarat spesifikasi dan cenderung meningkat. |
| 5 | Ari S. Adi. 2017. <u>Penggunaan Abu Batubara Hasil Pembakaran Asphalt Mixing Plant (AMP) Sebagai Bahan Campuran Lapis Aspal Beton (Laston) .</u> | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston (AC-BC) Filler fly ash (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal Pen 60/70 | Tidak Dibahas | Hasil penelitian menunjukkan bila menggunakan semen sebagai filler penambahan abu batubara 1%, 2%, 3%, 4% dan 5% memenuhi semua spesifikasi teknis pada campuran ACBC. | Filler fly yang digunakan yaitu 1%-5% karena pada kadar tersebut nilai untuk keseluruhan memenuhi syarat spesifikasi. |

(Sumber: Arsip Pribadi)

Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

| NO | JURNAL DARI | VARIABEL | | | KESIMPULAN | RENCANA VARIABEL YANG DIGUNAKAN |
|----|---|--|---|---|--|---|
| | | AGREGAT | ASPAL | TEMPERATUR PENGUJIAN | | |
| 6 | Akem. 2012. <i>Pengaruh Temperatur Pematatan Pada Lapis Perkerasan Lataston (HRS-WC) Yang Menggunakan Bahan Pengikat Retona Blend 55.</i> | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Lataston (HRS) 3/4", 1/2", 3/8", No. 8, No. 30, No. 50, No. 200 | Mengikuti persyaratan karakteristik Retona Blend 55 dan aspal modifikasi (-1,0%, -0,5%, +0,5%, +1,0%) | 125°C, 130°C, 135°C, 140°C, 145°C | Hasil pengujian di laboratorium dengan parameter Marshall diketahui pengaruh pematatan pada temperatur 135°C, 140°C, 145°C memenuhi syarat, sedangkan pematatan pada temperatur 125°C, 130°C tidak memenuhi syarat Marshall. | Agregat yang digunakan yaitu untuk campuran Lataston dengan spesifikasi untuk lalu lintas berat. Kadar aspal optimum yang didapat yaitu kadar aspal 6,5%. |
| 7 | Syarwan. 2012. <i>Kajian Variasi Temperatur Pematatan Pada Beton Aspal Menggunakan Aspal Retona Blend 55</i> Politeknik Negeri Lhokseumawe | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston (AC-BC). 3/4", 1/2", 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 200 | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal Retona Blend 55. (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%) | 70°C, 90°C, 100°C, 110°C, 130°C, 150°C | Dari hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan temperatur pematatan yang masih memenuhi persyaratan untuk campuran beton aspal AC-BC menggunakan aspal Retona Blend 55 adalah pada temperatur 130°C - 150°C, sedangkan untuk temperatur di bawah temperatur 130°C tidak memenuhi lagi persyaratan. | Kadar aspal optimum yang didapat yaitu kadar aspal 5,5%. |
| 8 | Widodo, Sri dan Ika Setyaningsih. 2013. <i>Penggunaan Alat Marshall Untuk Menganalisis Pengaruh Temperatur Terhadap Modulus Elastisitas Beton Aspal.</i> Universitas Muhammadiyah Surakarta | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston (AC-WC). | Tidak terdefiniskan | Temperatur Pengujian 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C | Hasil penelitian modulus elastisitas beton aspal Asphalt Concrete Wearing Course dengan alat Marshall pada temperatur 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, dan 65°C mengalami penurunan seiring penambahan temperatur. | Agregat yang digunakan yaitu untuk campuran laston dengan spesifikasi AC-WC. |

(Sumber: Arsip Pribadi)

Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

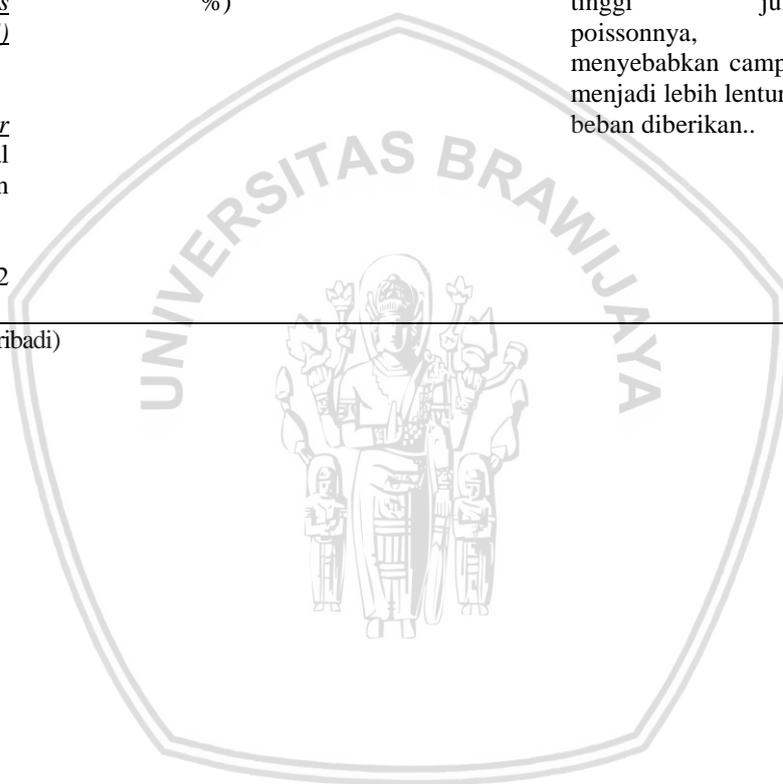
| NO | JURNAL DARI | VARIABEL | | | KESIMPULAN | RENCANA VARIABEL YANG DIGUNAKAN |
|----|--|--|--|------------------------------------|---|--|
| | | AGREGAT | ASPAL | TEMPERATUR PENGUJIAN | | |
| 9 | Aldian Nurcahya dkk. <u>Analisis Kinerja Campuran Aspal Porus Menggunakan Aspal Pen 60/70 Dan Aspal Modifikasi Polimer Elvaloy</u> ITB | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston. | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal porus pen 60/70, Polimer Elvaloy 1,5% dan 2,5% (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0%.) | Temperatur Pengujian 25°C dan 45°C | Kinerja campuran diukur berdasarkan hasil pengujian Modulus Resilien dengan alat uji UMATTA memberikan nilai Modulus Resilien sebesar 1042Mpa/223MPa=Pen 60/70, 1047Mpa/147Mpa=Elvaloy 1,5%, dan 1005Mpa/166MPa=Elvaloy 2,5% pada temperatur 25°C dan 45°C. Secara umum hasil terbaik campuran aspal porus diperoleh pada pemakaian aspal modifikasi Elvaloy 2,5% | Kadar aspal optimum yang didapat yaitu kadar aspal 5,64%, 5,68%, 5,62% Temperatur Pengujian yang dipakai yaitu 25°C dan 45°C |
| 10 | Aloysius Gregorius Lake.2010. <u>Kinerja Campuran Split Mastic Asphalt Dengan Beberapa Material Dari Kalimantan.</u> Universitas Brawijaya | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran SMA (12,50mm, 11,20mm, 8mm, 5mm, 2mm, 0,71mm, 0,25mm, 0,09mm) | Mengikuti persyaratan karakteristik aspal Pen 60/70 (4,5%, 5,5%, 6,5%, 7,5%, 8,5%.) | Tidak Dibahas | Material agregat dari Bulungan, Kutai dan Banjar jika dibandingkan untuk digunakan sebagai bahan campuran aspal yang paling baik adalah agregat dari kabupaten Banjar, karena memiliki nilai keausan agregat 23,48 dan kadar aspal optimum 6,315%, campuran aspal ini memiliki stabilitas 877,942kg. Nilai Modulus Resilen 4622,3 Mpa, 4450,67 Mpa, 3604,33 Mpa | Kadar aspal optimum yang didapat yaitu kadar aspal 7,155%, 6,789%, 6,315% |

(Sumber: Arsip Pribadi)

Tabel 2.8. Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

| NO | JURNAL DARI | VARIABEL | | | KESIMPULAN | RENCANA VARIABEL YANG DIGUNAKAN |
|----|--|--|---|--|--|--|
| | | AGREGAT | ASPAL | TEMPERATUR PENGUJIAN | | |
| 11 | Wiyono, Arselina Wood Ward.2012, <u>Pengaruh Temperatur Terhadap Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC) Dengan Kapur Sebagai Filler</u> . Jurnal Rekaya dan Manajemen Transportasi Vol II No. 2 Juli 2012 | Mengikuti persyaratan spesifikasi untuk campuran Laston (AC-WC). | Mengikuti persyaratan karakterist ik aspal Pen 60/70 (5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0%,7,5 %) | Temperatur pengujian yaitu 20°C, 30°C, 40°C, 50°C dan 60°C | Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar tingkat kapur, semakin berkurangnya nilai modulus elastisitasnya, namun berbanding terbalik. Untuk jumlah poisson dimana kadar kalsium lebih tinggi, semakin tinggi jumlah poissonnya, menyebabkan campuran menjadi lebih lentur saat beban diberikan.. | Temperatur pengujian yaitu 20°C - 60°C dengan kenaikan 10°C. |

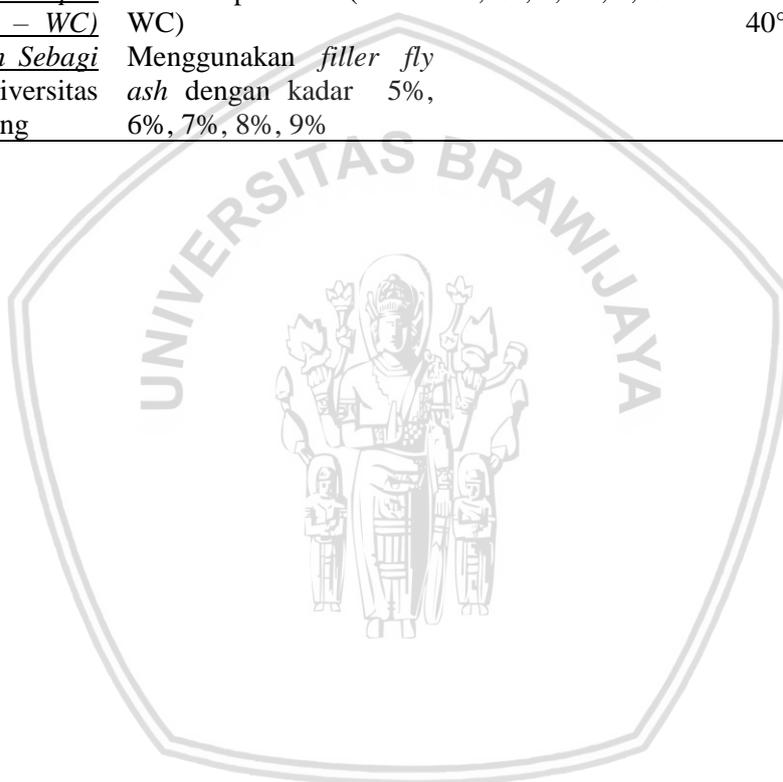
(Sumber: Arsip Pribadi)



Dari beberapa penelitian terdahulu maka peneliti bermaksud melakukan percobaan terhadap “Penggunaan *Fly Ash* Sebagai *Filler* Terhadap Modulus Resilien Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC)”. Tabel 2.9. menjelaskan variabel – variabel yang akan dijadikan sebagai dasar penelitian.

Tabel 2.9. Rancangan Penilitan

| JUDUL | VARIABEL | | |
|--|--|--|--|
| | AGREGAT | ASPAL | TEMPERATUR PENGUJIAN MODULUS RESILEN |
| Muhammad Sadillah.2018 <i>Pengaruh Modulus Resilien Terhadap Beton Aspal Lapis Aus (AC – WC) dengan Fly Ash Sebagai Filler.</i> Universitas Brawijaya Malang | Menggunakan persyaratan spesifikasi untuk campuran aspal beton lapis aus (AC – WC) | Menggunakan aspal pen 60/70 dengan kadar 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% | Menggunakan temperatur pengujian yaitu 25°C, 30°C, 35°C, 40°C dan 45°C |



BAB III

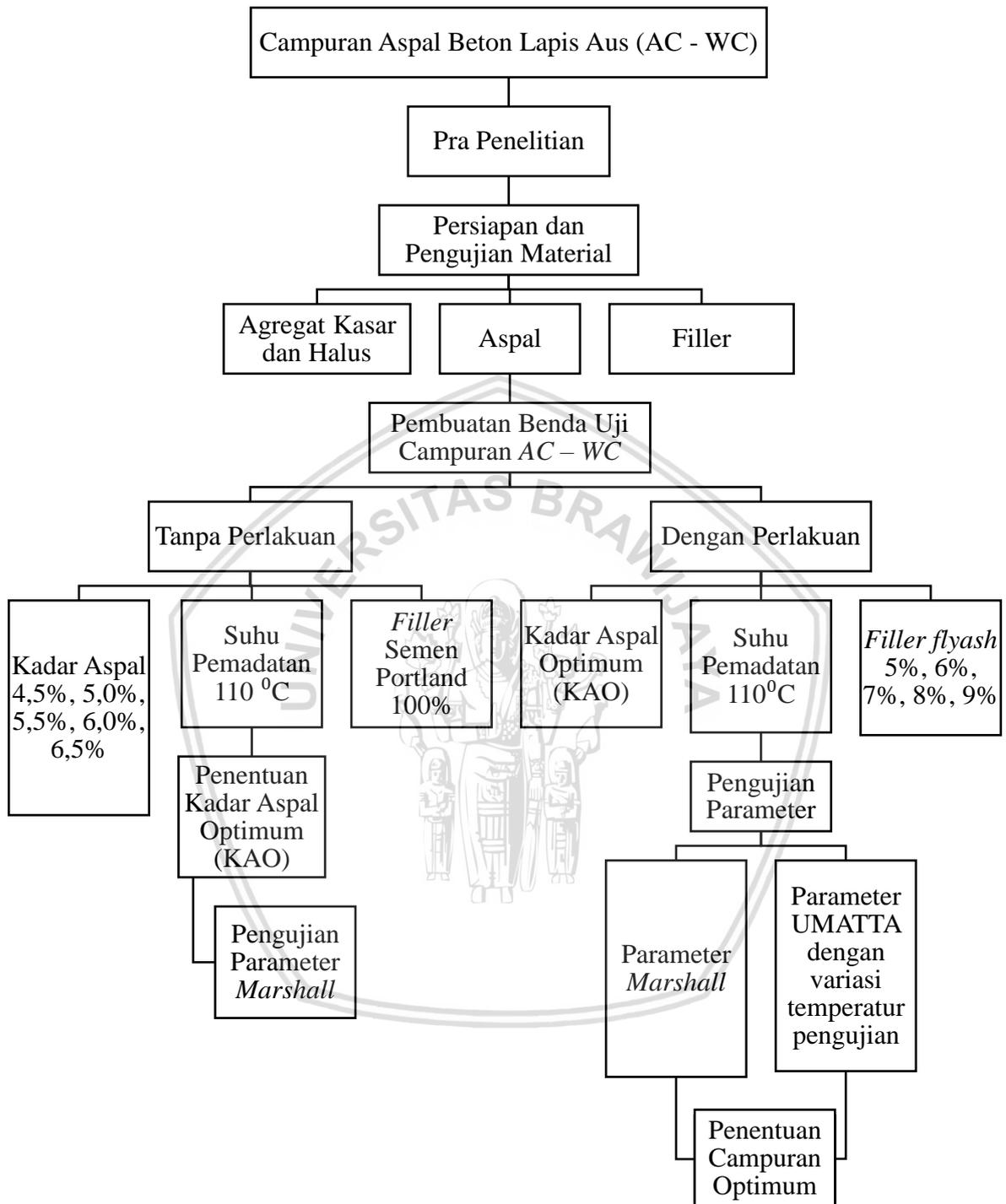
KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Pemikiran

Dampak perubahan iklim dapat dirasakan di beberapa sektor salah satunya adalah sektor transportasi. Dalam transportasi perkerasan jalan memegang peranan penting terjadi mobilitas dari suatu daerah ke daerah lain. Dengan terjadinya pemanasan global maka berdampak juga dengan pada permukaan jalan aspal beton. Dampak dari perubahan iklim ini dapat dilihat dari permukaan jalan yang mudah rusak karena sering terpapar temperatur iklim yang tidak menentu. Selain dari iklim, gesekan ban kendaraan yang terjadi secara terus-menerus dapat mengakibatkan terjadi panas yang merusak ban kendaraan atau merusak dari konstruksi perkerasan itu sendiri. Dalam upaya meningkatkan kekuatan struktur campuran beton aspal lapisan aus (AC-WC) selain perlu adanya penggunaan campuran beraspal panas dengan spesifikasi baru, pemilihan jenis material yang digunakan adalah sangat penting. Selain aspal, agregat baik kasar maupun halus serta *filler* adalah salah satu komponen dalam suatu konstruksi perkerasan jalan yang mempunyai peranan besar. Prosentase yang kecil pada *filler* terhadap campuran bukan berarti tidak mempunyai efek yang besar pada sifat-sifat *marshall* yang juga merupakan kinerja campuran terhadap beban lalu lintas. *Fly ash* (abu terbang) adalah salah satu residu yang dihasilkan dalam pembakaran industri batubara atau Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang terdiri dari partikel-partikel halus yang berterbangan. Dibanyak pabrik atau industri *fly ash* dianggap sebagai limbah yang tidak digunakan lagi sehingga dalam penelitian ini menjadi nilai tambah dan nilai guna dari bahan tersebut untuk dapat dimanfaatkan sebaik mungkin.

Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai penetapan *temperatur* pengujian dan prosentase *filler fly ash* yang baik sehingga dapat diterapkan dan mampu mengatasi kerusakan-kerusakan. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan karakteristik campuran beton aspal terhadap sifat *marshall*, sehingga akan meningkatkan nilai struktural dari lapisan perkerasan seperti nilai stabilitas, fleksibilitas, durabilitas dan impermeabilitas (kedap air).

3.2 Kerangka Konsep Penelitian



Gambar 3.1. Kerangka Konsep Penelitian

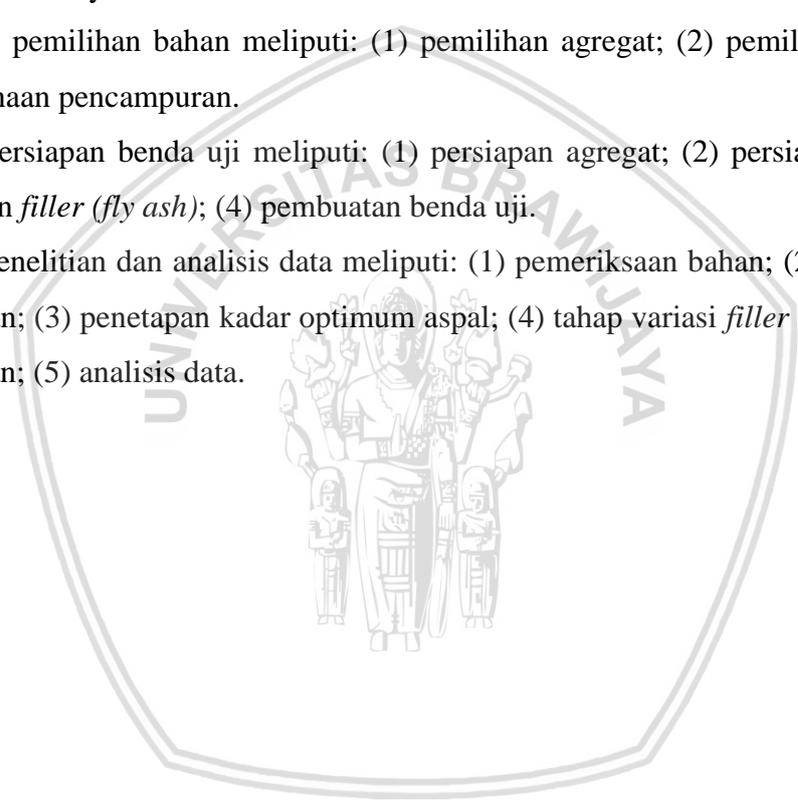
BAB IV

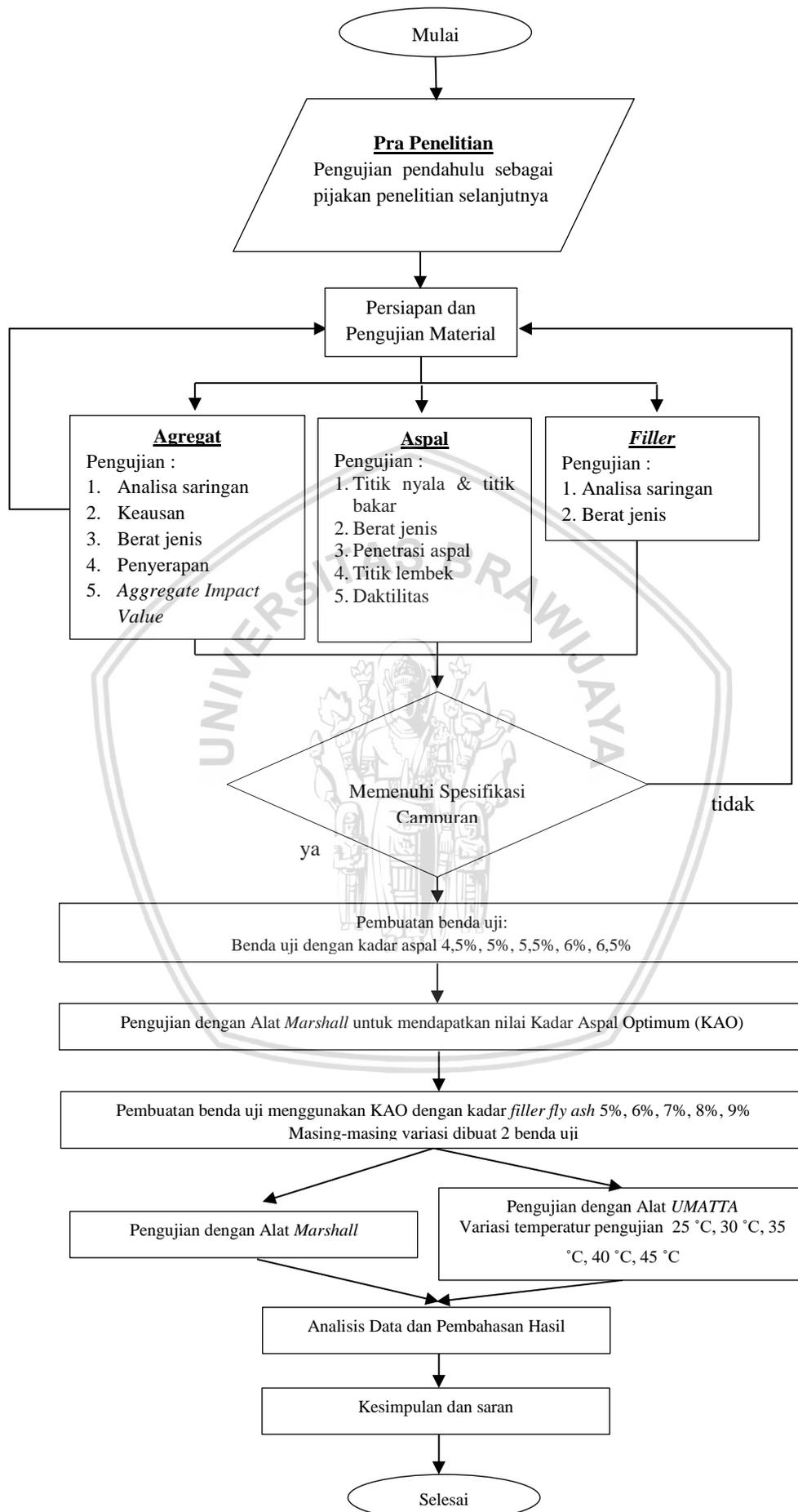
METODE PENELITIAN

4.1 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

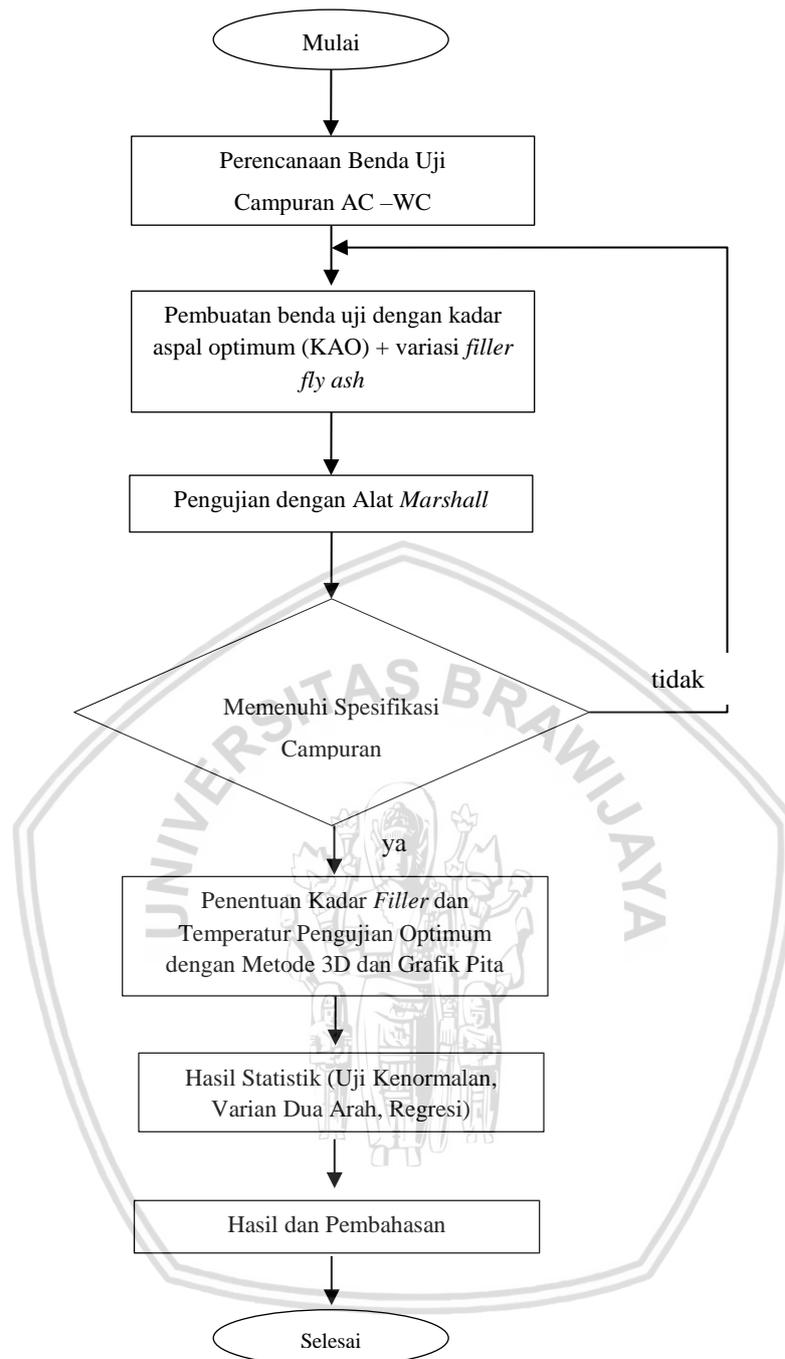
Dalam penelitian ini terbagi dalam 3 (tiga) tahapan dari mulainya penelitian sampai dengan selesainya penelitian yang dijelaskan dalam sebuah diagram alir seperti Gambar 4.1, tahapan tersebut yaitu:

1. Tahapan pemilihan bahan meliputi: (1) pemilihan agregat; (2) pemilihan aspal; (4) perencanaan pencampuran.
2. Tahap persiapan benda uji meliputi: (1) persiapan agregat; (2) persiapan aspal; (3) persiapan *filler* (*fly ash*); (4) pembuatan benda uji.
3. Tahap penelitian dan analisis data meliputi: (1) pemeriksaan bahan; (2) perencanaan campuran; (3) penetapan kadar optimum aspal; (4) tahap variasi *filler* dan temperatur pengujian; (5) analisis data.

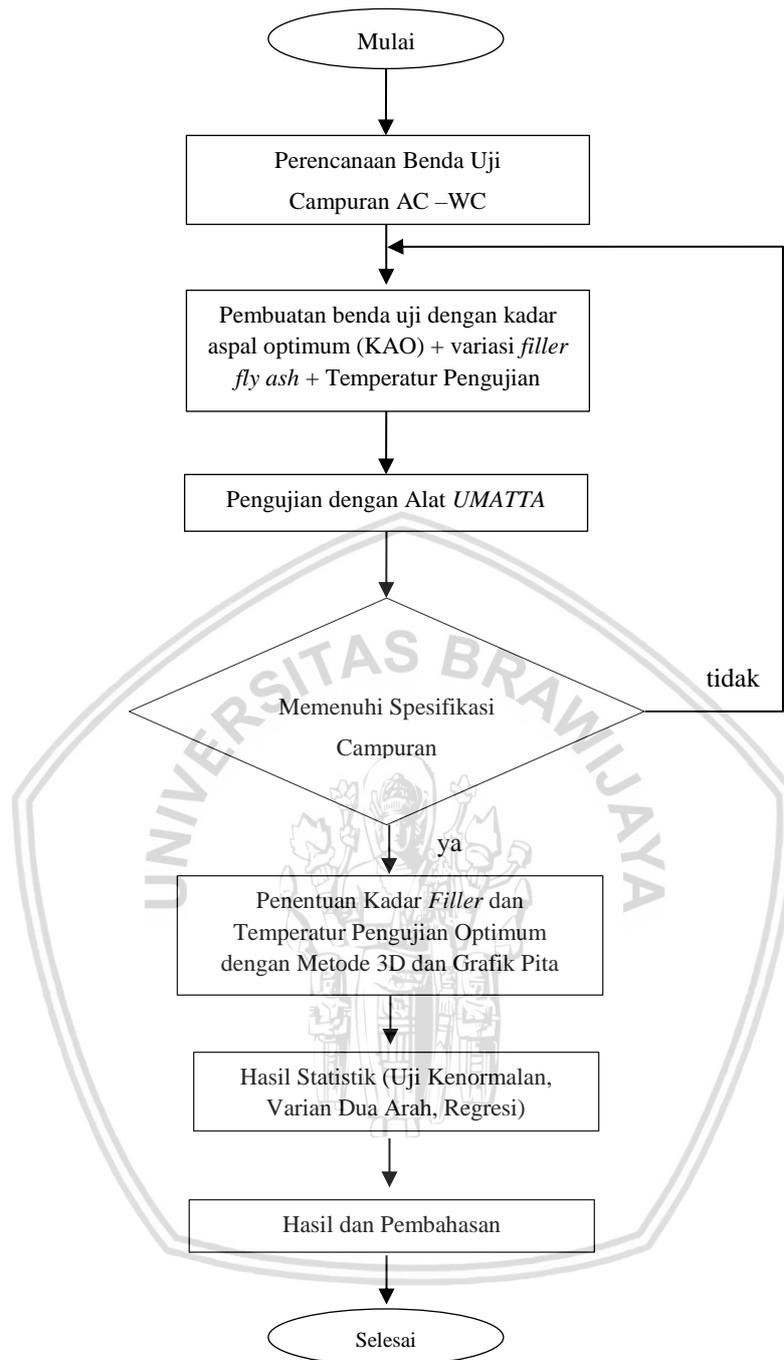




Gambar 4.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 4.2. Diagram Alir Penentuan Kadar Campuran Optimum Ditinjau Dari Nilai Parameter Marshall



Gambar 4.3. Diagram Alir Penentuan Kadar Campuran Optimum Ditinjau Dari Nilai Parameter UMATTA

4.2 Tahap Pemilihan Bahan

Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain:

4.2.1 Agregat

Agregat kasar harus terdiri dari batu pecah atau kerikil pecah yang bersih, kering, kuat, awet dan bebas dari bahan sampah lainnya yang mengganggu serta harus memenuhi berbagai syarat yang sudah ditentukan yaitu sebagai berikut : (a) keausan pada 500 putaran maksimum 40%, (b) kelekatan agregat dengan aspal minimum 95%, (c) jumlah berat butiran tertahan saringan No. 4 yang memiliki paling tidak dua bidang pecah, minimum 50% (khusus untuk kerikil pecah), (d) penyerapan air maksimum 3%, (e) berat jenis curah (bulk) minimum 2,5% (khusus terak), (f) bagian yang lunak minimum 5%. Merujuk pada Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3 tentang gradasi agregat kasar, maka gradasi yang digunakan adalah gradasi yang memiliki tingkat gradasi halus dan dapat digunakan untuk lapisan permukaan jalan pada perkerasan jalan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.1. Kebutuhan agregat untuk satu benda uji di bawah ini:

Tabel 4.1. Kebutuhan Agregat Untuk Satu Benda Uji

| No Saringan | Ukuran Saringan (mm) | Spesifikasi | % Lolos | % Tertahan | Berat (gram) |
|--------------------|----------------------|-------------|---------|------------|--------------|
| 3/4 | 19 | 100 | 100 | 0 | 0 |
| 1/2" | 12,5 | 90-100 | 95 | 5 | 50 |
| 3/8" | 9,5 | 72-90 | 81 | 14 | 140 |
| No. 4 | 4,75 | 54-69 | 61 | 20 | 200 |
| No. 8 | 2,36 | 39,1-53 | 46 | 15 | 150 |
| No. 16 | 1,18 | 31,6-40 | 35 | 11 | 110 |
| No. 30 | 0,600 | 23,1-30 | 26 | 9 | 90 |
| No. 50 | 0,300 | 15,5-22 | 18 | 8 | 80 |
| No. 100 | 0,150 | 9-15 | 12 | 6 | 60 |
| No. 200 | 0,075 | 4-10 | 7 | 5 | 50 |
| PAN | 0 | 0 | 0 | 7 | 70 |
| Berat Total | | | | | 1000 |

(Sumber : Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

4.2.2 Aspal Minyak atau Aspal Keras Penetrasi 60/70

Aspal untuk lapis beton aspal harus memiliki nilai penetrasi yang tinggi yaitu aspal dengan penetrasi 60/70 yang seragam, tidak mengandung air, bila dipanaskan pada temperatur 175°C aspal tidak mengeluarkan busa dan memenuhi persyaratan aspal yang tercantum pada Tabel 2.2.

4.2.3 Perencanaan Pencampuran

Sebelum melakukan pencampuran, dilakukan pengujian bahan yang akan digunakan apakah memenuhi spesifikasi atau tidak. Setelah itu dilanjutkan dengan membuat benda uji untuk setiap campuran. Banyaknya benda uji yang dibuat dapat ditentukan dengan rumus pendekatan berikut (Suharto, 2004) :

$$(r - 1) \cdot (t - 1) \gg 15$$

Dimana : r = Replikasi atau perulangan

t = Treatment atau perlakuan

Dalam penelitian ini digunakan lima jenis variasi *filler* dengan lima variasi temperatur. Sehingga jumlah treatment adalah 20, maka :

$$(r - 1) \cdot (t - 1) \gg 15$$

$$(r - 1) \cdot (20 - 1) = 15$$

$$20r - 1r - 20 + 1 = 15$$

$$9r - 19 = 15$$

$$r = 15 + 19 / 9$$

$$= 1,789$$

$$\gg 2 \text{ buah}$$

Dari perhitungan tersebut maka untuk masing-masing perlakuan dibuat 2 benda uji. Untuk perencanaan campuran dapat dilihat pada Tabel 4.2. di bawah ini:

Tabel 4.2. Daftar Perencanaan Pencampuran Benda Uji

| Variasi Kadar <i>Filler</i> | Kadar Aspal | Variasi Temperatur Pengujian | | | | | Jumlah Benda Uji |
|-----------------------------|-------------|------------------------------|------|------|------|------|------------------|
| | | 25°C | 30°C | 35°C | 40°C | 45°C | |
| 5% | KAO | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| 6% | KAO | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| 7% | KAO | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| 8% | KAO | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| 9% | KAO | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| | | | | | | | 50 |

(Sumber: Rencana Benda Uji)

4.2.4 Perlakuan dan Ulangan

Penelitian ini menggunakan metode perlakuan lima variasi kadar aspal, enam kadar *filler*, lima variasi temperatur pengujian yang berbeda dengan dua ulangan untuk tiap perlakuan. Kemudian menghasilkan olahan data.

4.2.5 Variabel Pengamatan

Variabel pengamatan adalah segala sesuatu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari sehingga didapatkan sebuah informasi untuk diambil sebuah kesimpulan. Variabel penelitian dibedakan menjadi 3 yaitu:

1. Variabel *Independen* (Pengaruh, Bebas, Stimulus, Prediktor) adalah variabel yang mempengaruhi timbulnya variabel terikat. Variabel bebas yang terdapat pada penelitian ini adalah kadar aspal 4,5%, kadar aspal 5,0%, kadar aspal 5,5%, kadar aspal 6,0%, kadar aspal 6,5%, kadar *filler* 0,0%, kadar *filler* 5,0%, kadar *filler* 6,0%, kadar *filler* 7,0%, kadar *filler* 8,0%, kadar *filler* 9,0%, temperatur pengujian 25°C, temperatur pengujian 30°C, temperatur pengujian 35°C, temperatur pengujian 40°C, temperatur pengujian 45°C.
2. Variabel *Dependen* (Dipengaruhi, Terikat, Output, Kriteria, Konsekuensi) adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat. Karena adanya variabel bebas. Variabel terikat yang ada pada penelitian ini adalah nilai berat jenis campuran beton aspal, nilai stabilitas, nilai keelehan (*flow*), nilai *VFB*, nilai *VIM*, nilai *VMA*, nilai *Marshall Quotient* (MQ) dan nilai *UMATTA*.
3. Variabel kontrol adalah variabel konstan yang digunakan untuk membandingkan variabel lain. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi nilai nilai stabilitas, nilai keelehan (*flow*), nilai *VFB*, nilai *VIM*, nilai *VMA*, nilai *Marshall Quotient* (MQ) dan nilai *UMATTA* antara lain adalah:
 - a. Asal dan kondisi agregat
 - b. Keausan agregat
 - c. Jenis aspal
 - d. Presentase aspal dalam campuran
 - e. Cara pembuatan benda uji
 - f. Perawatan benda uji
 - g. Temperatur pengujian benda uji
 - h. Penambahan *filler fly ash*
 - i. Cara pengujian benda uji

4.2.6 Waktu Pelaksanaan Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai dari tanggal 1 – 30 Agustus 2017, yang akan dilaksanakan di Laboratorium Laboratorium Transportasi dan Penginderaan Jauh Universitas Brawijaya. Sedangkan pelaksanaan penelitian dengan menggunakan peralatan

UMATTA dilaksanakan di Laboratorium PUSLITBANG Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Indonesia, Bandung - Jawa Barat.

4.3 Persiapan Benda Uji

4.3.1. Persiapan Agregat

Agregat yang digunakan berupa fraksi batuan yang dapat dibagi menjadi agregat kasar. Pemeriksaan dan pengujian meliputi:

a) Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar (SK SNI 03-1968-1990)

Langkah kerja:

Sebelum dilakukan diperiksa dan diuji benda uji dibersihkan dari kotoran yang menempel sampai hilang, lalu dikeringkan di dalam oven sampai beratnya tetap. Setelah di oven, benda uji didinginkan pada *temperatur* ruang selama 1-3 jam, lalu timbang dengan ketelitian 0,5 gram (BK). Setelah itu benda uji direndam selama ± 24 jam pada *temperatur* kamar, kemudian benda uji dikeluarkan dari air dan dilap dengan kain yang memiliki daya serap sampai selaput air pada permukaan hilang (SSD), timbang benda uji kering permukaan jenuh (B). Langkah selanjutnya adalah benda uji diletakkan di dalam keranjang, guncangkan agar udara yang terserap keluar kemudian ditimbang di dalam air (BA).

b) Pengujian keausan agregat kasar (SK SNI 03-1968-1990)

Langkah kerja:

Sebelum dilakukan pengujian benda uji dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran yang menepel sampai hilang. Lalu benda uji dikeringkan di dalam oven dengan *temperatur* 110 ± 5 °C sampai beratnya tetap setelah di oven, benda uji dikeluarkan dan didinginkan $\pm 1-2$ jam. Setelah dingin benda uji dimasukkan ke dalam silinder mesin *Los Angeles* bersama dengan 11 bola baja. Putar mesin dengan kecepatan 30-33 rpm hingga mencapai 500 putaran. Setelah selesai pemutaran keluarkan benda uji dari mesin *Los Angeles*, kemudian saring dengan ayakan No. 12. Butiran yang tertahan pada saringan No. 12 dicuci bersih dan di oven sampai beratnya tetap pada *temperatur* 110 ± 5 °C, kemudian ditimbang.

c) Pengujian keausan agregat kasar (SNI 03-1996-1990)

Langkah kerja:

Sebelum dilakukan pengujian benda uji dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran yang menepel sampai hilang. Lalu benda uji dikeringkan di dalam oven dengan *temperatur* 110 ± 5 °C sampai beratnya tetap setelah di oven (A), benda uji dikeluarkan dan didinginkan \pm

1-2 jam. Setelah dingin benda uji dimasukkan ke dalam cup sebanyak 1/3 bagian lalu ditumbuk sebanyak 25 kali lakukan sampai terisi penuh kemudian diletakkan di bawah alat uji. Atur ketinggian palu agar jarak antara bidang kontak palu dengan permukaan sampel 380 ± 5 mm. Lepaskan pengunci palu dan biarkan palu jatuh bebas ke sampel. Angkat palu pada posisi semula dan lepaskan kembali (jatuh bebas). Tumbukan dilakukan sebanyak 15 kali. Setelah selesai saring benda uji dengan saringan 2,36 mm kemudian timbang berat yang lolos (B) dan yang tertahan (C).

4.3.2. Persiapan Aspal

Aspal adalah material *thermoplastic* yang secara bertahap mencair sesuai dengan penambahan *temperatur*. Pemeriksaan dan pengujian aspal meliputi:

a) Pengujian titik nyala dan titik bakar aspal (SNI 06-2343-1991)

Langkah kerja:

Pertama letakkan cawan yang telah berisi aspal di atas pelat pemanas dan aturlah sumber pemanas sehingga terletak di bawah titik tengah cawan. Kemudian letakkan nyala penguji dengan poros pada jarak 7,5 cm dari titik tengah cawan. Tempat termometer tegak lurus di dalam benda uji dengan jarak 6,4 mm di atas cawan dan terletak pada suatu garis yang menghubungkan titik tengah cawan dan titik poros dari pada nyala penguji, kemudian atur sehingga poros termometer terletak pada jarak $\frac{1}{4}$ " diameter cawan dari tepi lalu tempatkan penahan angin di depan nyala penguji. Setelah penahan angin dipasang, nyalakan sumber pemanas dan aturlah pemanas sehingga kenaikan *temperatur* menjadi $15 \pm 1^\circ\text{C}$ permenit sampai benda uji mencapai *temperatur* 56°C di bawah titik nyala perkiraan, kemudian aturlah kecepatan pemanas 5°C sampai 6°C permenit pada *temperatur* antara 56°C dan 28°C di bawah titik nyala perkiraan, kemudian nyalakan nyala penguji dan aturlah agar diameter nyala penguji menjadi 3,2 mm sampai 4,8 mm. Putarlah nyala penguji sehingga melalui permukaan cawan (dari tepi ke tepi cawan) dalam waktu satu detik, ulangi pekerjaan tersebut setiap kenaikan 2°C . Lanjutkan pekerjaan tersebut sampai terlihat nyala singkat pada suatu titik di atas permukaan benda uji dan baca *temperatur* termometer pada saat terlihat nyala singkat tersebut lalu dicatat. Lanjutkan terus pekerjaan ini sampai terlihat nyala yang agak lama sekurang-kurangnya 5 detik di atas permukaan benda uji, bacalah *temperatur* pada termometer dan dicatat.

b) Pengujian berat jenis aspal (SK SNI 06-2441-1991)

Langkah kerja:

Pertama, ambil *piknometer* kosong lalu ditimbang (A). Setelah itu air murni dimasukkan ke dalam *piknometer* sampai penuh lalu ditutup tanpa ditekan dan ditimbang

(B), setelah ditimbang air dibuang dan *piknometer* dikeringkan, kemudian benda uji dimasukkan ke dalam *piknometer* kira-kira 2/3 dari tingginya lalu ditimbang (C), kemudian air murni dimasukkan ke dalam *piknometer* yang berisi benda uji lalu ditutup tanpa ditekan. *Piknometer* dengan tambahan benda uji dan air murni ditimbang (D).

c) Pengujian penetrasi aspal (SK SNI 06-2456-1991)

Langkah kerja:

Benda uji yang telah dipanaskan dituang ke dalam cawan aspal dengan ketinggian tidak kurang dari angka penetrasi ditambah 10 mm sebanyak 2 buah benda uji, kemudian benda uji didinginkan pada *temperatur* ruang selama 1 sampai 1 ½ jam. Membersihkan dan menyetel jarum penetrasi pada tempatnya, kemudian berikan pemberat 50 gram di atas jarum untuk memperoleh beban sebesar $100 \pm 0,1$ gram. Setelah itu letakkan cawan air yang berisi air minum dan aspal di bawah jarum penetrasi, kemudian jarum penetrasi diturunkan perlahan-lahan sampai menyentuh permukaan benda uji. Setelah jarum penetrasi siap, aturlah angka 0 pada arloji *penetrometer* di atas jarum penetrasi, sehingga jarum penunjuk berhimpit dengannya. Turunkan jarum penetrasi dengan menekan tombol pada alat *penetrometer*, biarkan jarum masuk di dalam benda uji selama $5 \pm 0,1$ detik. Setelah itu baca besarnya angka penetrasi pada arloji *penetrometer*. Lakukan pekerjaan tersebut sebanyak 3 kali setiap benda uji.

d) Pengujian titik lembek aspal (SK SNI 06-2434-1991)

Langkah kerja:

Aspal dipanaskan sampai merata kemudian dituangkan ke dalam dua buah cincin yang diletakkan di atas pelat/kaca yang telah diolesi *talk* atau sabun. Setelah itu benda uji didinginkan dan diratakan dengan pisau/*spatula* yang telah dipanaskan. Benda uji yang telah diratakan dipasang pada dudukan benda uji dan diberi bola baja di atas benda uji tersebut. Setelah itu benda uji beserta dudukannya dimasukkan ke dalam bejana gelas yang berisi air dengan *temperatur* $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Setelah itu bejana dipanaskan sehingga kenaikan *temperatur* bejana menjadi 5°C permenit. Amati terus pekerjaan tersebut sampai aspal yang diberikan beban bola baja tersebut turun sampai menyentuh dudukan.

e) Pengujian daktilitas aspal (SNI 06-2432-1991)

Langkah kerja:

Sebelumnya aspal dipanaskan terlebih dahulu pada *temperatur* 80°C - 100°C di atas titik lembek kemudian dituangkan pada cetakan. Sebelum dituangi aspal permukaan bawah dan samping cetakan (bagian yang akan dilepas) diberi campuran *gliserin* dan *dextrin* atau sabun agar aspal tidak melekat. Setelah aspal dituangkan pada cetakan, kemudian aspal

diratakan dengan *spatula*. Setelah rata aspal direndam selama 30 menit dalam bak perendam. Setelah itu benda uji diletakkan pada mesin penguji dengan melepas bagian sisi bawah dan sisi samping cetakan. Setelah itu mesin dinyalakan sehingga mesin menarik benda uji dengan kecepatan 5 cm/menit sampai benda uji tersebut putus. Selama pengujian hendaknya benda uji selalu terendam sekurang-kurangnya 2,5 cm dari air.

4.3.3. Persiapan *Filler*

Bahan pengisi (*filler*) menggunakan *fly ash* (abu terbang) yang lolos saringan No. 200. Persiapan benda uji yaitu benda uji harus kering dan bersih dari segala macam kotor yang menempel, jika perlu dilakukan pengovenan agar benda uji benar-benar kering. Persiapan selanjutnya adalah saringan dari no 1/2” sampai dengan PAN dibersihkan dari sisa kotoran yang menempel, jika perlu dilakukan pencucian saringan dengan air bersih yang mengalir. Alat *shake sieve* juga dibersihkan dari sisa kotoran yang menempel dengan menggunakan kuas dan lap kain, kemudian hubungan alat dengan tenaga listrik dan letakan saringan yang sudah bersih di atas dudukan alat secara benar atau tidak miring. *Filler fly ash* yang sudah diayak dan lolos saringan No. 200 dimasukkan ke dalam plastik sampai memenuhi berat dari kebutuhan keseluruhan benda uji.

4.3.4. Pembuatan Benda Uji

Langkah awal yang harus dilakukan dalam pembuatan benda uji ini adalah menimbang agregat dengan berat campuran yaitu 1000 gram dan dipanaskan *temperatur* $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Di samping itu aspal penetrasi 60/70 juga dipanaskan hingga *temperaturnya* mencapai $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Kemudian aspal dengan kadar tertentu ditambahkan pada campuran agregat dan *filler fly ash*, lalu dicampur hingga *temperaturnya* mencapai $155 \pm 5^\circ\text{C}$. Setelah itu masukkan campuran beraspal pada cetakan lalu padatkan dengan *temperatur* yang sudah ditentukan sebelumnya yaitu *temperatur* 110°C .

Setelah proses pemadatan selesai benda uji didiamkan agar *temperaturnya* turun, setelah dingin benda uji dikeluarkan dengan *ejector* dan diberi kode penanda agar mudah pada saat mencatat hasil datanya. Setelah itu bersihkan benda uji dari kotoran-kotoran yang menempel dan ukur tinggi benda uji dengan jangka sorong dengan ketelitian 0,1 mm dan ditimbang beratnya pada saat di udara. Selanjutnya dilakukan perendaman benda uji selama 24 jam supaya benda uji jenuh air, setelah itu benda uji ditimbang dalam air.

Langkah selanjutnya rendamlah benda uji di dalam bak perendam (*water bath*) selama 30-40 menit dengan *temperatur* tetap yaitu 60°C ($\pm 1^\circ\text{C}$). Keluarkan benda uji dari bak perendam lalu letakkan ke dalam segmen bawah kepala penekan, pasang segmen atas di atas benda uji dan letakkan benda uji beserta segmen atas dan bawah tadi ke dalam mesin

penguji. Pasang arloji pengukur alir (*flow*) pada kedudukannya di atas salah satu batang penuntun dan atur kedudukan jarum penunjuk pada angka nol, sementara selubung tangkai arloji (*sleeve*) dipegang kokoh terhadap segmen atas kepala penekan. Sebelum pembebanan diberikan, kepala penekan beserta benda ujinya dinaikkan hingga menyentuh alas cincin penguji. Atur jarum arloji tekan pada kedudukan angka nol. Lalu berikan pembebanan kepala benda uji dengan kecepatan tetap sekitar 50 mm/menit sampai pembebanan maksimum tercapai atau pembebanan menurun seperti yang ditunjukkan oleh jarum arloji tekan dan catat pembebanan maksimum tercapai atau terpenuhi.

Pelaksanaan pengujian tes *marshall* dilakukan terhadap semua benda uji untuk mengetahui parameter-parameter, diantaranya adalah sebagai berikut : (1) stabilitas memberikan ukuran relatif dari kemampuan struktur campuran beton aspal untuk menerima beban sampai terjadi keruntuhan plastis, (2) *flow* menunjukkan perubahan bentuk campuran aspal akibat beban sampai batas keruntuhan plastis, (3) *marshall quotient* merupakan suatu nilai yang didapat dari nilai stabilitas dibagi *flow*, (4) rongga dalam campuran (*VIM*), (5) rongga antara mineral agregat (*VMA*).

Penelitian ini dilakukan dengan membuat benda uji dengan nilai kadar aspal mulai dari 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% untuk penentuan kadar aspal optimum. Kemudian pada kadar aspal optimum *filler* ditambahi dengan *fly ash* dengan kadar persentase 0%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%. Kemudian dilakukan pengujian dengan temperatur yang berbeda yaitu 25°C, 30 °C 35 °C, 40 °C, 45°C. Dalam penelitian ini dilakukan perencanaan untuk lalulintas berat dan dilakukan tumbukan sebanyak 75 kali secara bolak-balik pada masing-masing permukaan benda uji yang akan lebih diperjelas pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Jumlah Tumbukan Masing-masing Sisi Benda Uji

| Beban lalulintas | Jumlah lintasan sumbu standar 18000 pon (ESA) | Jumlah tumbukan masing-masing sisi benda uji |
|------------------|---|--|
| Ringan | $< 10^4$ | 35 |
| Sedang | $< 10^4 - 10^6$ | 50 |
| Berat | $< 10^6$ | 75 |

(Sumber: Sukirman, 2003)

4.4 Tahap Analisis Data

4.4.1 Uji Kenormalan Data

Uji kenormalan data dilakukan untuk mengetahui nilai variabel – variabel yang diperoleh dari data hasil pengamatan terdistribusi normal atau mendekati normal. Salah satu metode yang digunakan dalam menganalisis populasi yang terdistribusi normal yaitu uji kenormalan *Kolmogrov – Smirnov Goodness of Fit Test*. Proses pengujiannya

menggunakan program SPSS. Indikator penentu diterima atau ditolakanya Hipotesis nol (H_0) adalah dengan melihat tingkat probabilitas. Jika P_{hitung} lebih besar dari 5% maka dapat dikatakan bahwa H_0 diterima (populasi terdistribusi normal), begitu juga sebaliknya. Apabila data yang diperoleh sudah terdistribusi normal maka dilanjutkan dengan analisis variansi.

4.4.2 Uji Varian Dua Arah

Salah satu teknik dalam mengestimasi hipotesa ini digunakan analisis variansi (*ANOVA*), yaitu metode penganalisaan yang berdasarkan pada variansi dari semua observasi, sehingga penyebab kesalahan akibat interaksi masing – masing kelompok sampel dapat diperhitungkan variabelitasnya. Analisis variansi pada penelitian ini menggunakan analisis variansi dua arah (*two way - ANOVA*). Uji *ANOVA* yang dipergunakan untuk menguji hipotesa nol lazim juga disebut dengan uji F. Harga F diperoleh dari rata – rata jumlah kuadrat antara kelompok yang dibagi dengan rata – rata jumlah kuadrat dalam kelompok. Perumusan secara statistik dinyatakan sebagai berikut:

$$Z = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha, \beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (4-1)$$

Keterangan:

- μ = Nilai rata – rata
- α_i = Pengaruh kadar *filler* ke i
- β_j = Pengaruh temperatur pengujian ke j
- $(\alpha, \beta)_{ij}$ = Pengaruh kedua varian
- ε_{ij} = Kesalahan

Hipotesis statistik yang diuji adalah:

- $H_0 : \mu\alpha_1 = \mu\alpha_2 = \dots = \mu\alpha_i$
 $H_1 : \text{paling sedikit satu pasang } \mu\alpha_i \text{ yang tidak sama } \neq 0$
- $H_0 : \mu\beta_1 = \mu\beta_2 = \dots = \mu\beta_j$
 $H_1 : \text{paling sedikit satu pasang } \mu\beta_j \text{ yang tidak sama } \neq 0$
- $H_0 : (\alpha, \beta)_{11} = (\alpha, \beta)_{12} = \dots = (\alpha, \beta)_{ij}$
 $H_1 : \text{paling sedikit satu pasang } (\alpha, \beta)_{ij} \text{ yang tidak sama } \neq 0$

Dimana:

H_0 = Hipotesis nol, yang menyatakan bahwa tidak terdapat pengaruh dari faktor proporsi *filler* dan faktor temperatur pengujian atau interaksi keduanya terhadap parameter campuran aspal beton lapis aus AC – WC

H_1 = Hipotesis alternatif, yang menyatakan bahwa terdapat pengaruh dari faktor proporsi *filler* dan faktor temperatur pengujian atau interaksi keduanya terhadap parameter campuran aspal beton lapis aus AC - WC

Bentuk analisis dari pengujian hipotesis dapat dilihat dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.4. Analisis Data

| SK | db | JK | KT | Fhitung |
|-------------------------------------|----------------|--|--|--------------------------|
| Perlakuan | (ab-1) | JK _p | KT _p | |
| Temperatur pengujian | (a-1) | JK temperatur pengujian | KT temperatur pengujian | $F_{hitung\ sp}$ |
| <i>Filler</i> | (b-1) | JK <i>filler</i> | KT <i>filler</i> | $F_{hitung\ filler}$ |
| Temperatur pengujian, <i>filler</i> | (a-1) (b-1) | JK Temperatur pengujian, <i>filler</i> | KT Temperatur pengujian, <i>filler</i> | $F_{hitung\ sp, filler}$ |
| Galat percobaan | ab(n-1) | JKG = JKT - JK _p | KT _p | |
| Total | (nab-1) | JK _{total} | | |

Keterangan:

| | |
|-------------------------|--|
| a | = Jumlah variasi temperatur pengujian |
| b | = Jumlah variasi <i>filler</i> |
| n | = Jumlah perulangan |
| JK total | = Jumlah kuadrat total = $\sum_i \sum_j (\sum_k Y_{ijk}) = FK$ |
| FK | = Faktor koreksi = $\sum_i \sum_j (\sum_k Y_{ijk}^2) / nab$ |
| JK perlakuan | = Jumlah kuadrat perlakuan = $\sum_i \sum_j (\sum_k Y_{ijk}^2) / n - FK$ |
| JK Gpercb | = JK _{total} - JK _{perlakuan} |
| JK temperatur pengujian | = Jumlah kuadrat temperatur pengujian = $\sum_i (\sum_j \sum_k Y_{ijk})^2 - FK$ |
| JK <i>filler</i> | = Jumlah kuadrat <i>filler</i> = $\sum_j (\sum_i \sum_k Y_{ijk})^2 - FK$ |
| KT perlakuan | = kuadrat tengah perlakuan = $JK_p / (ab-1)$ |
| KT temperatur pengujian | = kuadrat tengah temperatur pengujian = $JK_{temperatur\ pengujian} / (a-1)$ |
| KT <i>filler</i> | = kuadrat tengah <i>filler</i> = $JK_{filler} / (b-1)$ |
| KT G | = kuadrat tengah galat |

$$= JKG / ab(n-1)$$

Fhitung temperatur = KT temperatur pengujian / KTG

pengujian = KT *filler* / KTG

Fhitung *filler* = KT *filler*, temperatur pengujian / KTG

Fhitung sp, *filler*

Dari analisa statistik tersebut didapat harga F_{hitung} yang akan dibandingkan dengan F_{tabel} . Apabila $F_{hitung} > F_{tabel}$, berarti ada pengaruh variasi temperatur pengujian aspal, proporsi kadar *filler*, ataupun keduanya terhadap nilai stabilitas, VIM, VMA, VFB dan nilai Flow pada penelitian ini. Demikian juga apabila $F_{hitung} < F_{tabel}$, maka kesimpulan yang terjadi adalah sebaliknya. Proses perhitungan analisis variansi ini menggunakan bantuan program SPSS.

4.4.3 Analisa Regresi

Hubungan antara temperatur pengujian dan proporsi *filler* terhadap karakteristik campuran dinyatakan dengan persamaan regresi. Bentuk persamaan regresi yang dipilih adalah persamaan polinomial berganda, karena nilai – nilai karakteristik campuran aspal beton lapis aus $AC - WC$ yang dicari berupa kurva lengkung dan variabel – variabel penyusunnya terdiri dari satu variabel terikat dan lebih dari satu variabel bebas. Proses perhitungannya menggunakan bantuan program SPSS.

Dengan memasukan variabel – variabel yang diperlukan, akan didapatkan suatu model persamaan regresi derajat dua (kuadratik). Untuk menguji apakah persamaan regresi ini dapat dipergunakan atau tidak, maka akan diuji dengan uji F (ANOVA). Jika probabilitas $< 0,05$; H_0 ditolak, maka ada pengaruh antara variasi kadar *filler* dan variasi temperatur pengujian dalam karakteristik *marshall*. Jika output menunjukkan nilai probabilitas $> 0,05$; H_0 diterima, maka tidak ada pengaruh antara variasi kadar *filler* dan variasi temperatur pengujian dalam karakteristik *marshall*. Sedangkan koefisien determinasi (R^2) dipakai untuk mengetahui seberapa besar presentase dukungan variabel bebas terhadap variabel terikat.

Dalam penelitian ini variabel – variabel penyusun persamaan regresi terdiri atas satu variabel terikat dan dua variabel bebas sehingga dipilih persamaan regresi berganda dengan rumus umum sebagai berikut:

$$Z_i = b_0 + b_1x + b_2y + b_3(x)^2 + b_4xy + b_5(y)^2 + b_6(x)^2y + b_7(y)^2x + b_8(x)^2(y)^2$$

(4-2)

Keterangan:

Z = nilai – nilai yang diukur (variabel respon)

X = variasi temperatur pengujian (variabel penjelas)

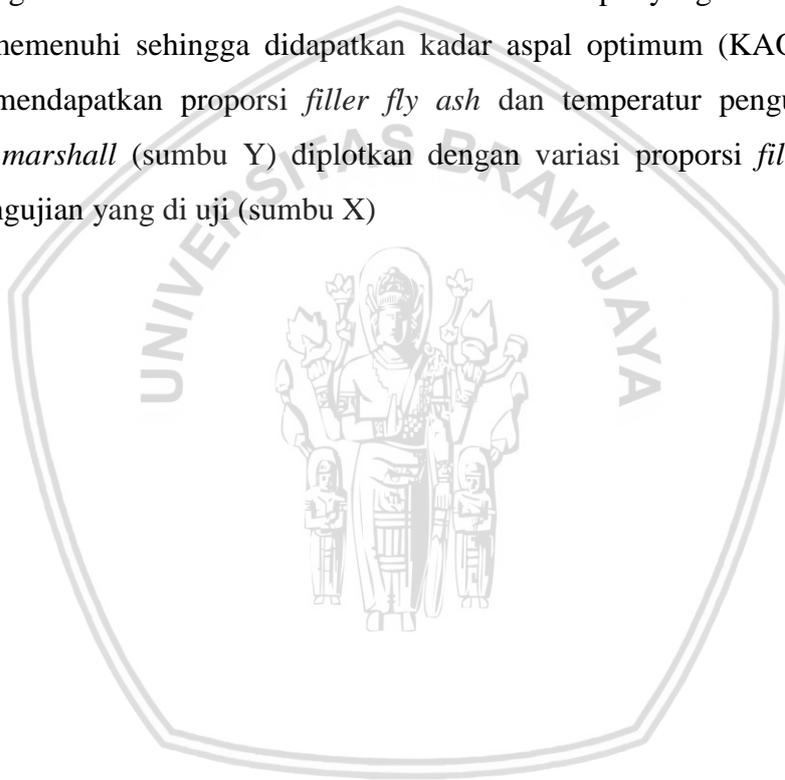
Y = variasi proporsi *filler* (variabel penjelas)

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$ dan b_8 = parameter yang dicari

Koefisien – koefisien b_0 sampai b_8 diperoleh dari perhitungan SPSS

4.4.4 Metode Diagram Pita

Metode diagram pita hasil penelitian di laboratorium yaitu parameter uji *marshall* - (VIM, VMA stabilitas, *flow*, MQ) sebagai sumbu Y diplotkan dengan variasi kadar aspal yang diuji sebagai sumbu X. Kemudian dicari nilai kadar aspal yang semua parameter uji *marshallnya* memenuhi sehingga didapatkan kadar aspal optimum (KAO). Begitu pula dengan cara mendapatkan proporsi *filler fly ash* dan temperatur pengujian optimum, parameter uji *marshall* (sumbu Y) diplotkan dengan variasi proporsi *filler fly ash* dan temperatur pengujian yang di uji (sumbu X)



BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Hasil Pengujian

Kadar aspal optimum didapat melalui berbagai macam pengujian yaitu (1) pengujian agregat, (2) pengujian aspal, (3) pengujian *marshall*. Pengujian yang dilakukan menghasilkan beberapa macam syarat yang harus dipenuhi oleh agregat kasar dan aspal agar bisa digunakan sebagai benda uji. Berikut ini merupakan hasil dari penelitian yang dilakukan.

5.1.1 Pengujian Agregat

Pengujian agregat ini dilakukan untuk mengetahui bahwa agregat yang akan bisa digunakan sebagai benda uji. Di bawah ini akan dijelaskan lebih lanjut tentang pengujian agregat pada Tabel 5.1. Data hasil pengujian agregat kasar, halus dan *filler fly ash*:

Tabel 5.1. Data Hasil Pengujian Agregat Kasar, Halus dan *Filler Fly Ash*

| No | Pengujian | Unit | Spesifikasi* | | Hasil | Keterangan |
|-----------------------|------------|-----------------------|--------------|------|-------|------------|
| | | | Min | Maks | | |
| Agregat Kasar | | | | | | |
| 1 | BJ Bulk | (gr/cm ³) | 2,5 | - | 2,71 | Memenuhi |
| 2 | BJ SSD | (gr/cm ³) | - | - | 2,76 | Memenuhi |
| 3 | BJ Semu | (gr/cm ³) | - | - | 2,84 | Memenuhi |
| 4 | Penyerapan | % | - | 3,0 | 1,78 | Memenuhi |
| 5 | Impact | % | | 30 | 6,39 | Memenuhi |
| 6 | Keausan | % | | 40 | 13,19 | Memenuhi |
| Agregat Halus | | | | | | |
| 1 | BJ Bulk | (gr/cm ³) | 2,5 | - | 2,63 | Memenuhi |
| 2 | BJ SSD | (gr/cm ³) | - | - | 2,70 | Memenuhi |
| 3 | BJ Semu | (gr/cm ³) | - | - | 2,82 | Memenuhi |
| 4 | Penyerapan | % | - | 3,0 | 2,49 | Memenuhi |
| Filler Fly Ash | | | | | | |
| 1 | BJ Bulk | (gr/cm ³) | 2,5 | - | 2,41 | Memenuhi |
| 2 | BJ SSD | (gr/cm ³) | - | - | 2,41 | Memenuhi |
| 3 | BJ Semu | (gr/cm ³) | - | - | 2,41 | Memenuhi |

(Sumber: Hasil Pengujian)

*(Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)



5.1.2 Pengujian Aspal

Pengujian aspal ini dilakukan untuk mengetahui bahwa aspal yang akan bisa digunakan sebagai benda uji. Di bawah ini akan dijelaskan lebih lanjut tentang pengujian aspal pada Tabel 5.2 Data hasil pengujian aspal:

Tabel 5.2. Data Hasil Pengujian Aspal

| No | Pengujian | Unit | Spesifikasi* | | Hasil | Keterangan |
|----|--------------|-----------------------|--------------|------|-------|------------|
| | | | Min | Maks | | |
| 1 | BJ | (gr/cm ³) | 1 | - | 1,04 | Memenuhi |
| 2 | Penetrasi | (mm) | 60 | 79 | 66,89 | Memenuhi |
| 3 | Titik Lembek | (°C) | 48 | 58 | 49 | Memenuhi |
| 4 | Titik Nyala | (°C) | 200 | - | 319 | Memenuhi |
| 4 | Titik Bakar | (°C) | 200 | - | 338 | Memenuhi |
| 5 | Daktalitas | (cm) | 100 | - | 150 | Memenuhi |

(Sumber: Hasil Pengujian)

*(Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

5.2 Hasil Uji Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC – WC)

Pengujian yang telah dilakukan memperoleh parameter-parameter *marshall* yaitu: stabilitas, *flow*, *marshall quotient*, *VIM*, dan *VMA*. Hasil analisis perhitungan dari parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Hasil Pengujian Marshall Terhadap KAO

| No | Pengujian | Unit | Spesifikasi* | | Hasil |
|----|--------------------------|---------|--------------|------|-------------------|
| | | | Min | Maks | |
| 1 | <i>VIM</i> | (%) | 3,0 | 5,0 | 2,50 - 6,60 |
| 2 | <i>VMA</i> | (%) | 15 | - | 17,13 – 20,90 |
| 3 | Stabilitas | (kg) | 800 | - | 1008,37 - 1499,51 |
| 4 | <i>Flow</i> | (mm) | 2,0 | 4,0 | 2,05 - 3,40 |
| 5 | <i>Marshall quotient</i> | (kg/mm) | 250 | - | 305,57 - 714,05 |

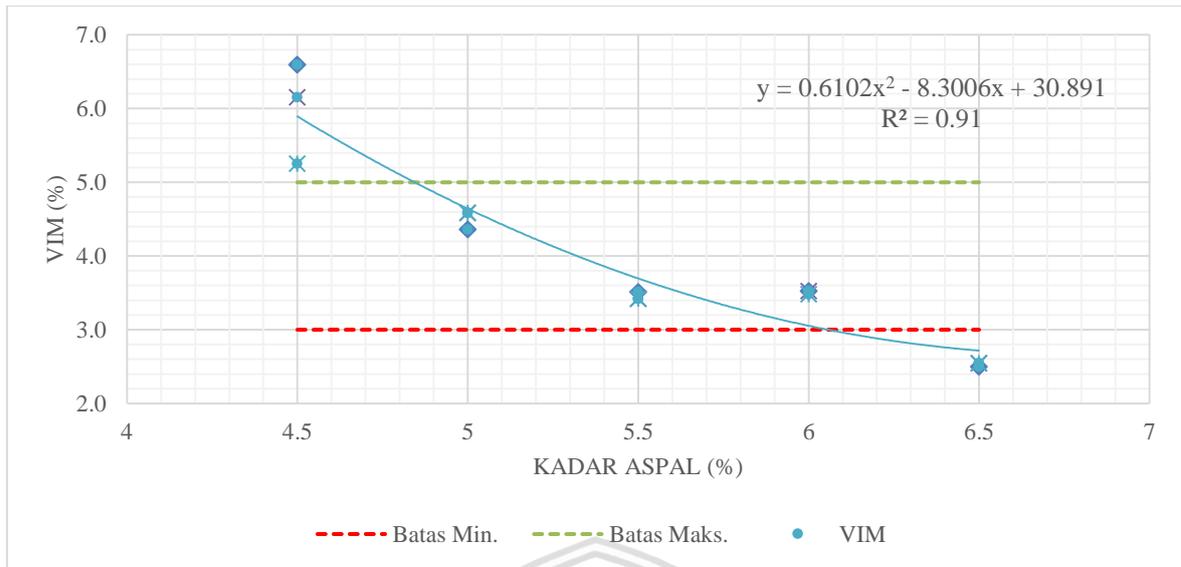
(Sumber: Hasil Pengujian)

*(Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

Parameter-parameter *marshall* yang diperoleh dalam pengujian yang telah dilakukan akan ditampilkan dalam bentuk grafik di bawah ini:

5.2.1 Void in Mixture (*VIM*)

VIM atau rongga dalam campuran merupakan pori-pori udara yang terdapat dalam campuran. Hasil *VIM* dengan perbandingan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.1. sebagai berikut:

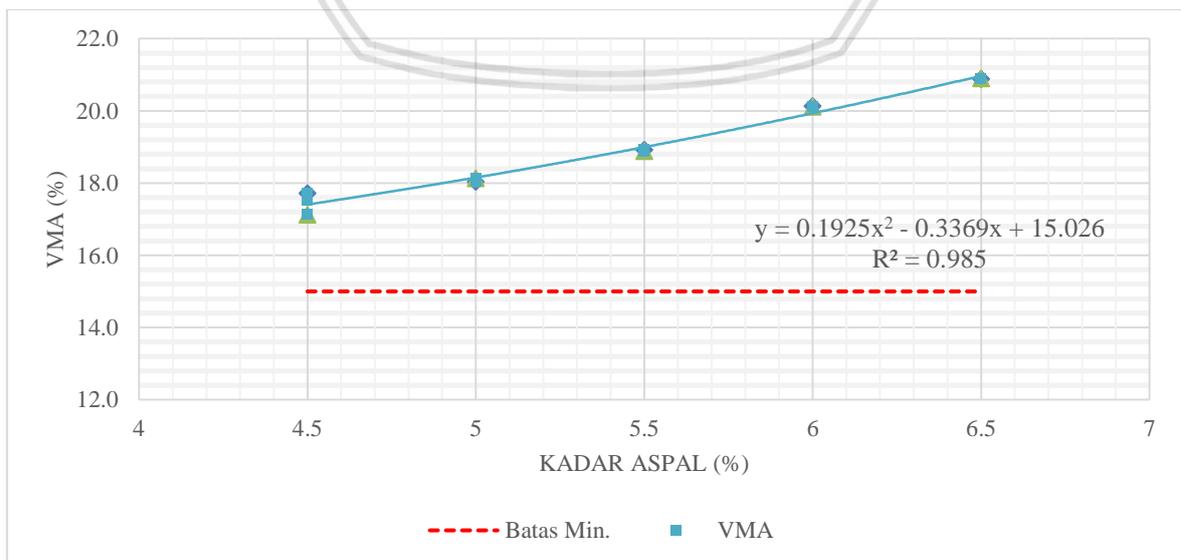


Gambar 5.1. Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VIM*

Pada Gambar 5.1. terlihat nilai tertinggi *VIM* pada pengujian yang dilakukan terdapat pada benda uji dengan kadar aspal 4,5% dengan nilai 6,60% kemudian nilai *VIM* terus turun seiring bertambahnya kadar aspal. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *VIM* untuk campuran beton aspal lapis aus (*AC-WC*) adalah 3,0% s/d 5,0%, kecuali pada benda uji dengan kadar aspal 4,5% dan 6,5% dimana nilai *flow* tidak memenuhi persyaratan yaitu dengan nilai 6,60 % dan 2,50 %.

5.2.2 Voids in Mineral Agregate (*VMA*)

VMA atau rongga dalam agregat merupakan pori-pori udara yang terdapat dalam agregat. Hasil *VMA* dengan perbandingan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.2. sebagai berikut:

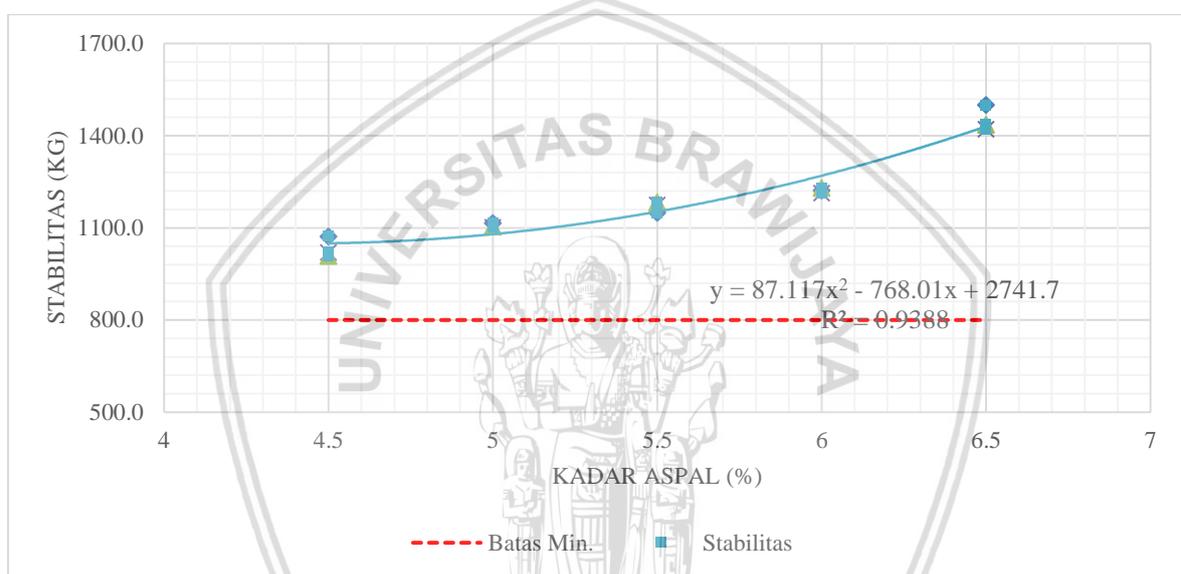


Gambar 5.2. Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VMA*

Pada Gambar 5.2. terlihat nilai tertinggi *VMA* pada pengujian yang dilakukan terdapat pada benda uji dengan kadar aspal 4,5% dengan nilai 17,13% kemudian nilai *VMA* terus naik seiring bertambahnya kadar aspal. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *VMA* untuk campuran beton aspal lapis aus (*AC-WC*) lebih besar atau sama dengan 15%.

5.2.3 Stabilitas

Stabilitas (kekuatan) merupakan kemampuan lapis keras untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya tanpa mengalami perubahan bentuk tetap seperti gelombang dan alur. Hasil stabilitas dengan perbandingan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.3. sebagai berikut:

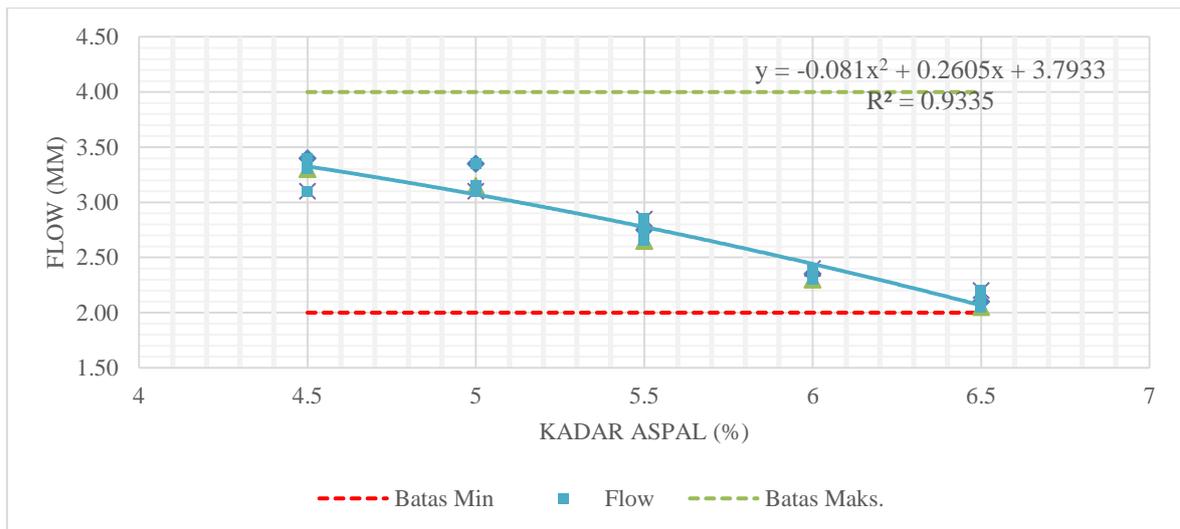


Gambar 5.3. Hubungan Antara Kadar Aspal dan dengan Stabilitas

Pada Gambar 5.3. menjelaskan terjadi kenaikan nilai stabilitas pada pengujian di atas disebabkan oleh penambahan kadar aspal pada benda uji, sehingga menyebabkan mudahnya butiran agregat yang terselimuti aspal untuk merapat pada saat dipadatkan. Nilai stabilitas terendah yaitu 1008,37 kg pada kadar aspal 4,5% kemudian naik sampai 1499,51 kg pada kadar aspal 6,5%. Keseluruhan benda uji penelitian memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai stabilitas untuk campuran beton aspal lapis aus (*AC-WC*) lebih besar atau sama dengan 800 kg.

5.2.4 Flow

Flow menunjukkan perubahan bentuk campuran aspal akibat beban sampai batas keruntuhan plastis. Hasil *flow* dengan perbandingan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.4. sebagai berikut:

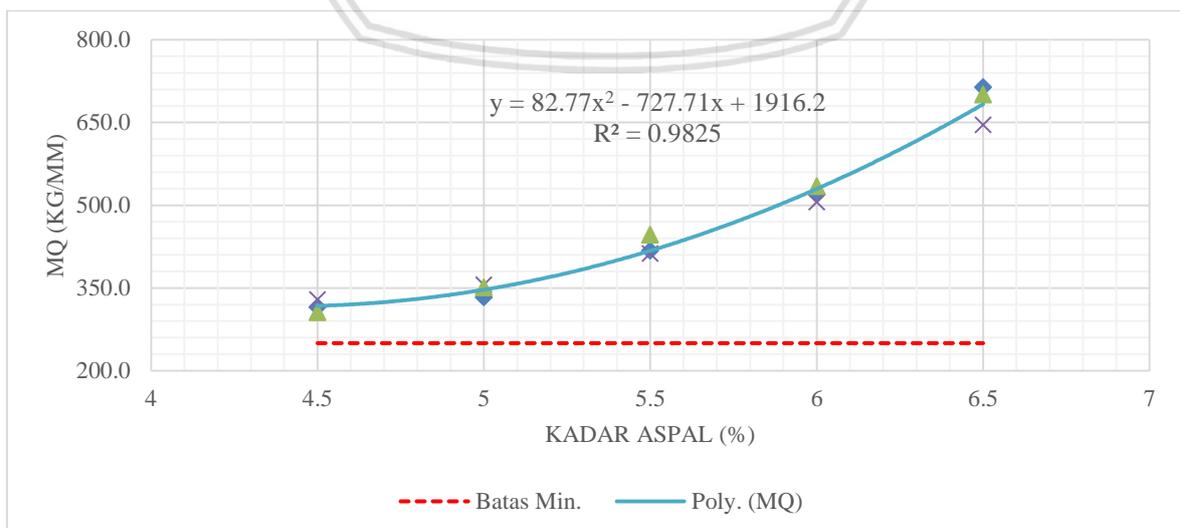


Gambar 5.4. Hubungan Antara Kadar Aspal dan dengan *Flow*

Pada Gambar 5.4. menjelaskan bahwa nilai tertinggi *flow* pada pengujian yang dilakukan terdapat pada benda uji dengan kadar aspal 4,5% dengan nilai 3,40 mm kemudian nilai *flow* terus turun seiring bertambahnya kadar aspal. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *flow* untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) lebih besar atau sama dengan 3 mm, kecuali pada benda uji dengan kadar aspal 6,5% dimana nilai *flow* tidak memenuhi persyaratan yaitu dengan nilai 1,90 mm.

5.2.5 Marshall Quotient

Marshall quotient merupakan hasil bagi dari harga stabilitas dengan *flow*. Hasil *marshall quotient* dengan perbandingan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.5. sebagai berikut:



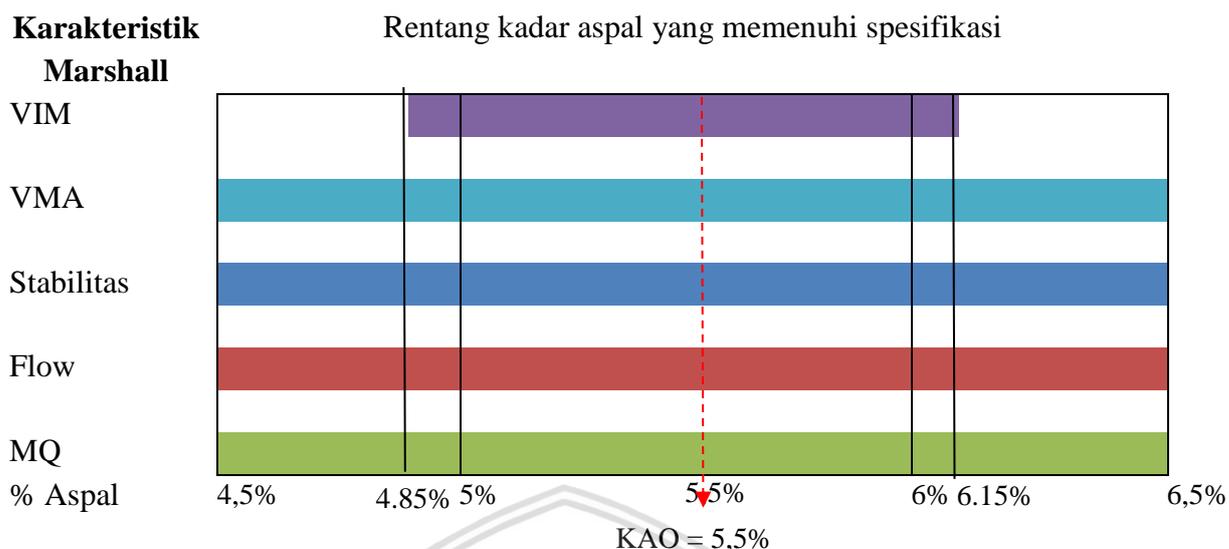
Gambar 5.5. Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *Marshall Quotient*

Pada Gambar 5.5. terlihat nilai *marshall quotient* pada pengujian yang dilakukan terus naik seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Nilai tertinggi *marshall quotient* yang masih memenuhi syarat yaitu pada kadar aspal 6,5% dengan nilai 789,22 kg/mm. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *flow* untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) lebih besar atau sama dengan 250 kg/mm.

5.3 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Berdasarkan petunjuk laston untuk jalan raya tentang persyaratan lapis aspal beton untuk lalu lintas berat (2 x 75 tumbukan), maka diperoleh nilai kadar aspal batas pada masing – masing grafik adalah sebagai berikut:

- 1) Grafik hubungan antara VIM (%) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = 0.6102x^2 - 8.3006x + 30.891$ dengan nilai y minimum = 3%, dan y minimum = 5% sehingga didapat nilai x minimum 4,85% dan x maksimum 6,15%.
- 2) Grafik hubungan antara VMA (%) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = 0.1925x^2 - 0.3369x + 15.026$ dengan nilai y minimum 15% sehingga didapat nilai x minimum 4,5% dan x maksimum 6,5%.
- 3) Grafik hubungan antara Stabilitas (Kg) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = 87.117x^2 - 768.01x + 2741.7$ dengan nilai y minimum 800kg sehingga didapat nilai x minimum 4,5% dan x maksimum 6,5%.
- 4) Grafik hubungan antara Flow (mm) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = -0.081x^2 + 0.2605x + 3.7933$ dengan nilai y minimum 2 mm, dan y minimum = 4 mm sehingga didapat nilai x minimum 4,5% dan x maksimum 6,5%.
- 5) Grafik hubungan antara MQ (Kg/mm) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = 82.77x^2 - 727.71x + 1916.2$ dengan nilai y minimum 250kg/mm sehingga didapat nilai x minimum 4,5% dan x maksimum 6,5%.
- 6) Persentase kadar aspal yang diperoleh dari grafik 5.1. sampai 5.5. diplotkan dalam suatu diagram pita metode bina marga yang berguna untuk memperoleh besarnya kadar aspal optimum. KAO diperoleh dengan mengambil beberapa indikator *marshall* antara lain stabilitas, *flow*, *marshall quotient*, VMA dan VIM yang memenuhi syarat dan diambil nilai yang paling ideal. KAO dari pengujian ini adalah pada kadar 5,50 % untuk lebih lengkapnya dapat dilihat dalam Gambar 5.6. sebagai berikut. Kadar aspal optimum $= \frac{4.85+6.15}{2} = 5,50 \%$



Gambar 5.6. Kadar Aspal Optimum (KAO)

Pada gambar 5.6. terlihat nilai untuk keseluruhan benda uji penelitian yang memenuhi persyaratan dari Bina Marga terdapat pada kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5%, 6% dan 6,5% untuk beberapa parameter *marshall* yaitu stabilitas, *flow*, *VIM*, dan *VMA*. Sedangkan parameter *VIM* ada 2 benda uji yang tidak memenuhi persyaratan dari Bina Marga yaitu pada kadar aspal 4,5% dan 6,5%. Sehingga dari benda uji yang memenuhi persyaratan diambil garis tengah yang akan digunakan sebagai KAO.

5.4 Hasil Uji Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC – WC) Dengan Variasi Kadar *Filler Fly Ash*

Pengujian yang telah dilakukan memperoleh parameter-parameter *marshall* yaitu: stabilitas, *flow*, *marshall quotient*, *VIM*, dan *VMA*. Hasil analisis perhitungan dari parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Hasil Pengujian Marshall Terhadap Variasi *Filler Fly Ash*

| No | Pengujian | Unit | Spesifikasi* | | Hasil |
|----|--------------------------|---------|--------------|------|-------------------|
| | | | Min | Maks | |
| 1 | <i>VIM</i> | (%) | 3,0 | 5,0 | 2,18 – 5,79 |
| 2 | <i>VMA</i> | (%) | 15 | - | 18,36 – 19,88 |
| 3 | Stabilitas | (kg) | 800 | - | 1196,99 – 1387,75 |
| 4 | <i>Flow</i> | (mm) | 2,0 | 4,0 | 3,50 – 3,95 |
| 5 | <i>Marshall quotient</i> | (kg/mm) | 250 | - | 303,04 – 391,49 |

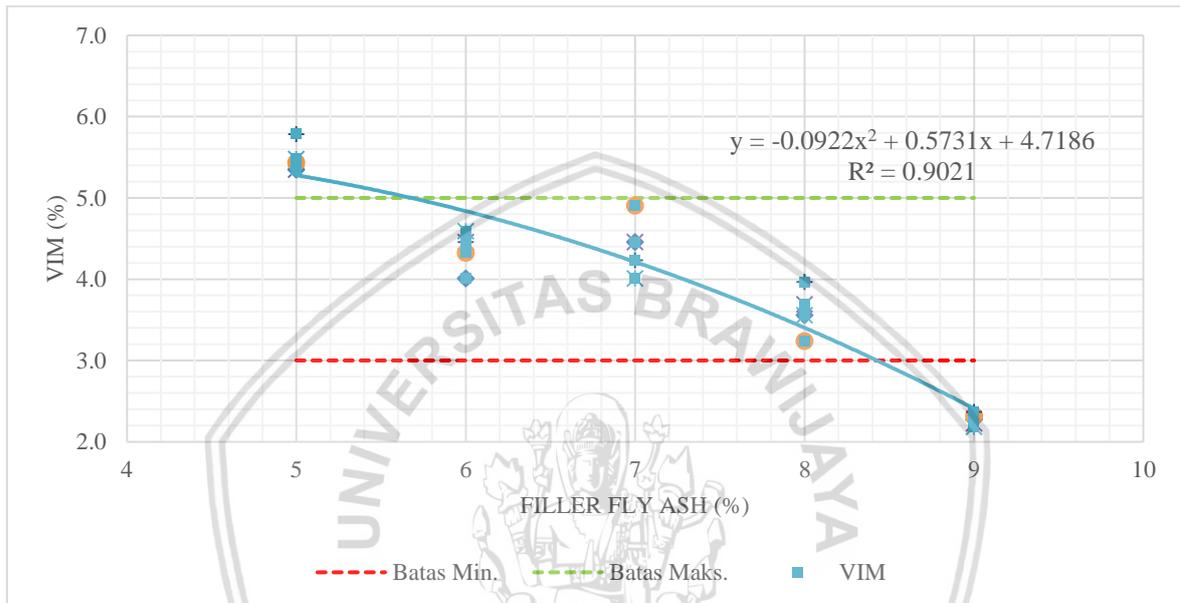
(Sumber: Hasil Pengujian)

*(Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum Edisi 2010 revisi 3)

Pengujian yang telah dilakukan memperoleh parameter-parameter *marshall* yaitu: stabilitas, *flow*, *marshall quotient*, *VIM*, dan *VMA* yang akan ditampilkan dalam bentuk grafik di bawah ini:

5.4.1 Void in Mixture (VIM)

VIM atau rongga dalam campuran merupakan pori-pori udara yang terdapat dalam campuran. Hasil *VIM* dengan perbandingan kadar *filler fly ash* dapat dilihat pada Gambar 5.7. sebagai berikut:

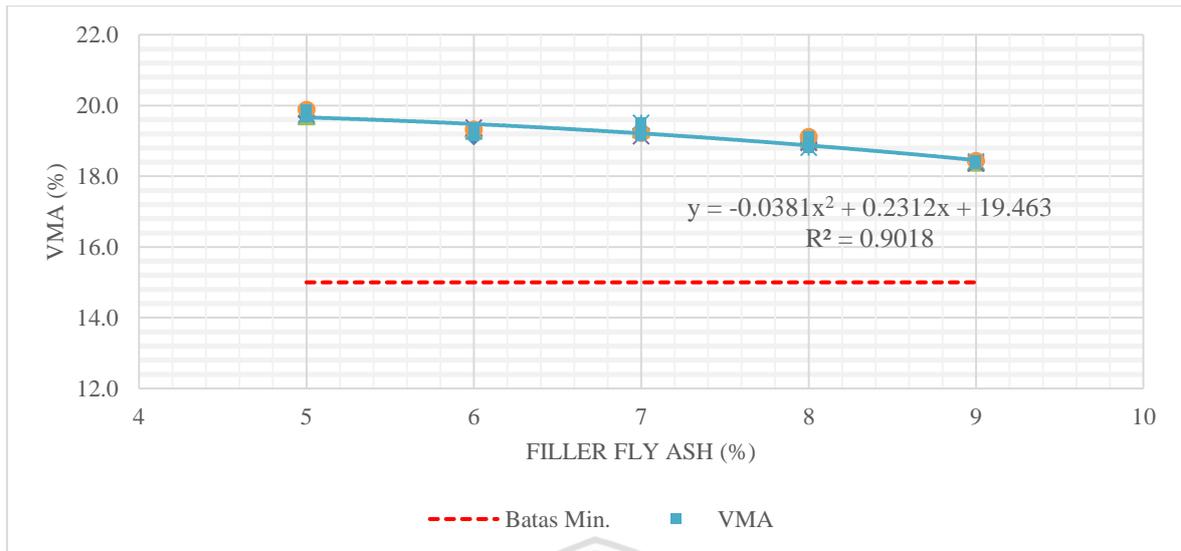


Gambar 5.7. Hubungan Antara Kadar *Filler Fly Ash* dengan *VIM*

Pada Gambar 5.7. terlihat nilai tertinggi *VIM* pada pengujian yang dilakukan terdapat pada benda uji dengan kadar *filler* 5% dengan nilai 5,79 % kemudian nilai *VIM* terus turun seiring bertambahnya kadar *filler*. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *VIM* untuk campuran beton aspal lapis aus (*AC-WC*) adalah 3,0% s/d 5,0%, kecuali pada benda uji dengan kadar aspal 5% dan 9% dimana nilai *VIM* tidak memenuhi persyaratan yaitu dengan nilai 2,18% dan 5,79%

5.4.2 Voids in Mineral Agregate (VMA)

VMA atau rongga dalam agregat merupakan pori-pori udara yang terdapat dalam agregat. Hasil *VMA* dengan perbandingan kadar *filler fly ash* dapat dilihat pada Gambar 5.8. sebagai berikut:

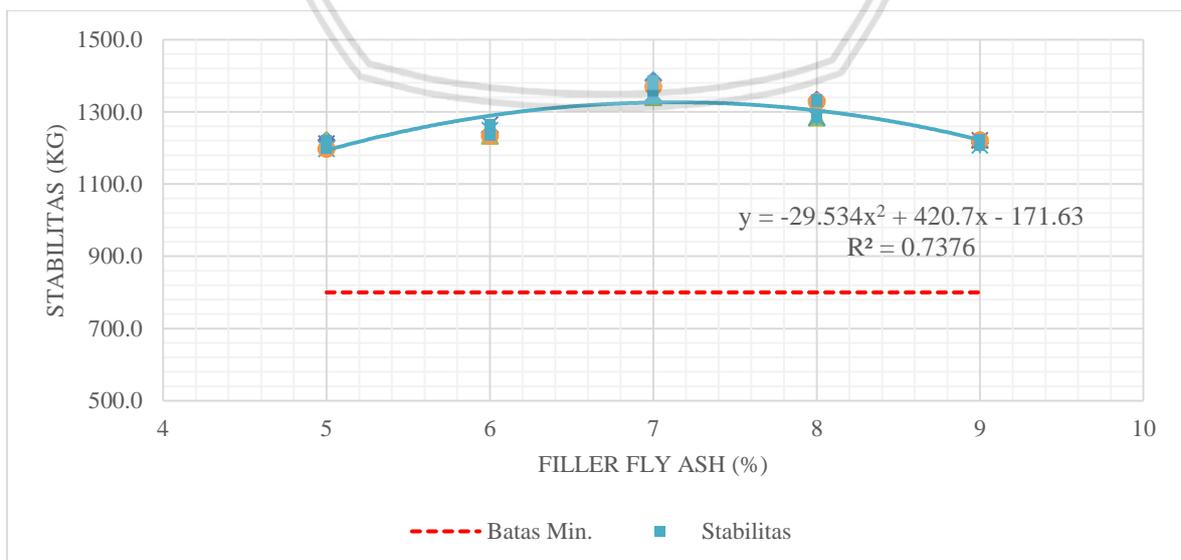


Gambar 5.8. Hubungan Antara Kadar *Filler Fly Ash* dengan *VMA*

Pada Gambar 5.8. terlihat nilai tertinggi *VMA* pada pengujian yang dilakukan terdapat pada benda uji dengan kadar *filler* 5% dengan nilai 19,88% kemudian nilai *VMA* terus turun seiring bertambahnya kadar *filler*. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *VMA* untuk campuran beton aspal lapis aus (*AC-WC*) lebih besar atau sama dengan 15%.

5.4.3 Stabilitas

Stabilitas (kekuatan) merupakan kemampuan lapis keras untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya tanpa mengalami perubahan bentuk tetap seperti gelombang dan alur. Hasil stabilitas dengan perbandingan kadar *filler fly ash* dapat dilihat pada Gambar 5.9. sebagai berikut:

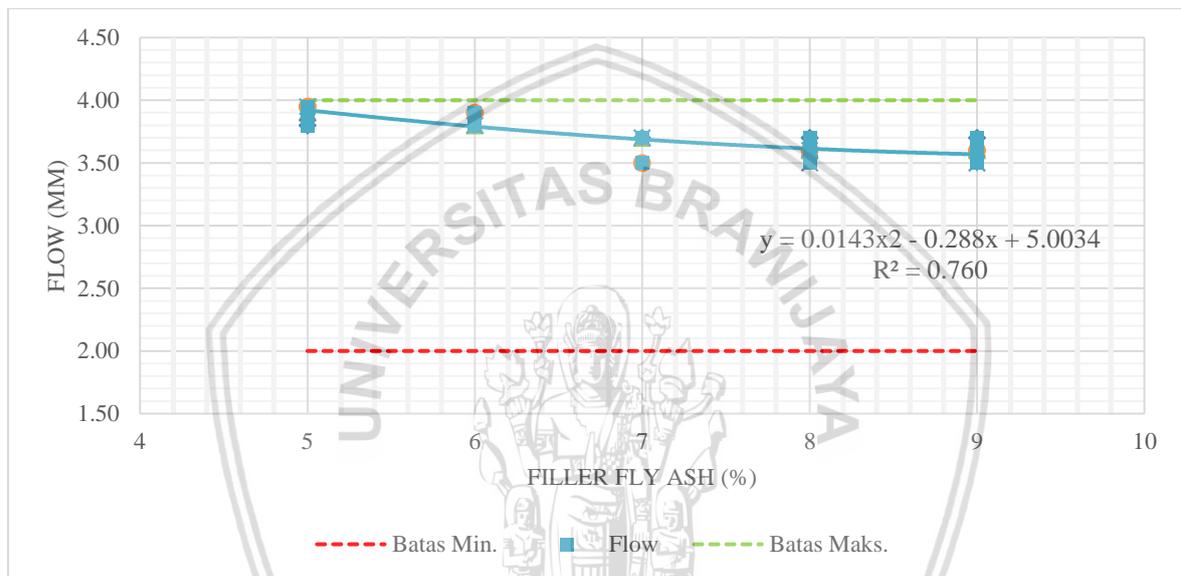


Gambar 5.9. Hubungan Antara Kadar *Filler Fly Ash* dengan Stabilitas

Pada Gambar 5.9. menjelaskan terjadi penurunan nilai stabilitas pada pengujian di atas, nilai stabilitas terendah yaitu 1196,99 kg pada kadar *filler* 5% kemudian naik sampai 1387,75 kg pada kadar kadar *filler* 7%. Keseluruhan benda uji penelitian memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai stabilitas untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) lebih besar atau sama dengan 800 kg.

5.4.4 Flow

Flow menunjukkan perubahan bentuk campuran aspal akibat beban sampai batas keruntuhan plastis. Hasil *flow* dengan perbandingan kadar *filler fly ash* dapat dilihat pada Gambar 5.10 sebagai berikut:

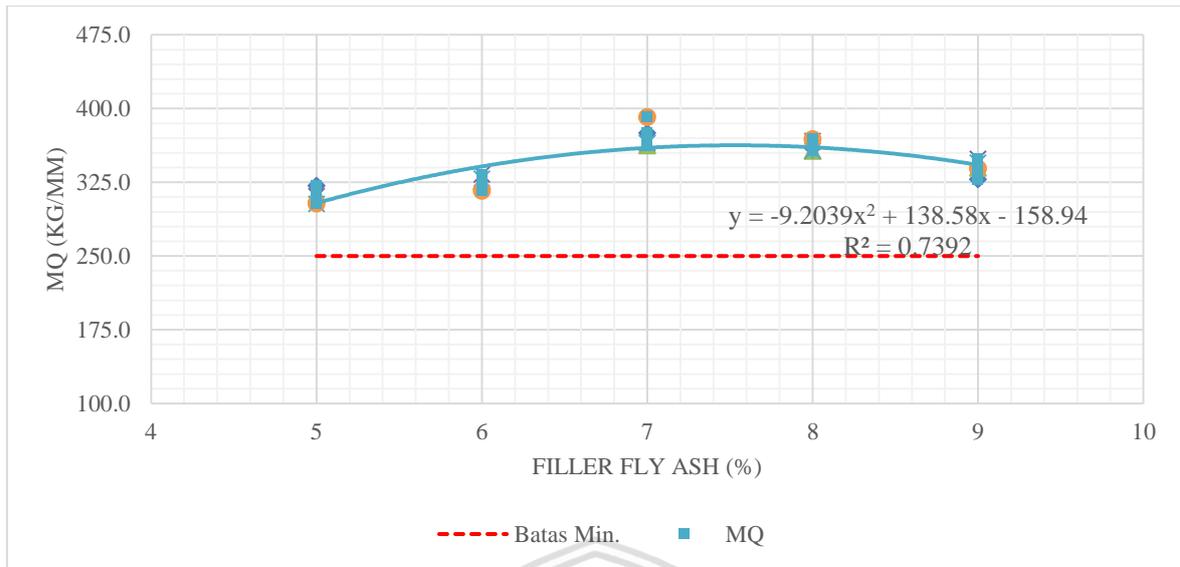


Gambar 5.10. Hubungan Antara Kadar *Filler Fly Ash* dengan *Flow*

Pada Gambar 5.10. menjelaskan bahwa nilai tertinggi *flow* pada pengujian yang dilakukan terdapat pada benda uji dengan kadar *filler* 5% dengan nilai 3,95 mm kemudian nilai *flow* terus turun seiring bertambahnya kadar *filler*. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *flow* untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) antara 2 - 4 mm.

5.4.5 Marshall Quotient

Marshall quotient merupakan hasil bagi dari harga stabilitas dengan *flow*. Hasil *marshall quotient* dengan perbandingan kadar *filler fly ash* dapat dilihat pada Gambar 5.11. sebagai berikut:



Gambar 5.11. Hubungan Antara Kadar *Filler Fly Ash* dengan *MQ*

Pada Gambar 5.11. terlihat nilai *marshall quotient* pada pengujian yang dilakukan terus naik seiring dengan bertambahnya kadar *filler*. Nilai tertinggi *marshall quotient* yang masih memenuhi syarat yaitu pada kadar *filler* 7% dengan nilai 319,49 kg/mm. Keseluruhan benda uji penelitian masih memenuhi syarat yang ditentukan oleh Bina Marga yaitu nilai *flow* untuk campuran beton aspal lapis aus (*AC-WC*) lebih besar atau sama dengan 250 kg/mm.

5.5 Penentuan Kadar Campuran Optimum Dengan Variasi Kadar *Filler Fly Ash*

Berdasarkan petunjuk laston untuk jalan raya tentang persyaratan lapis aspal beton untuk lalu lintas berat (2 x 75 tumbukan), maka diperoleh nilai kadar aspal batas pada masing – masing grafik adalah sebagai berikut:

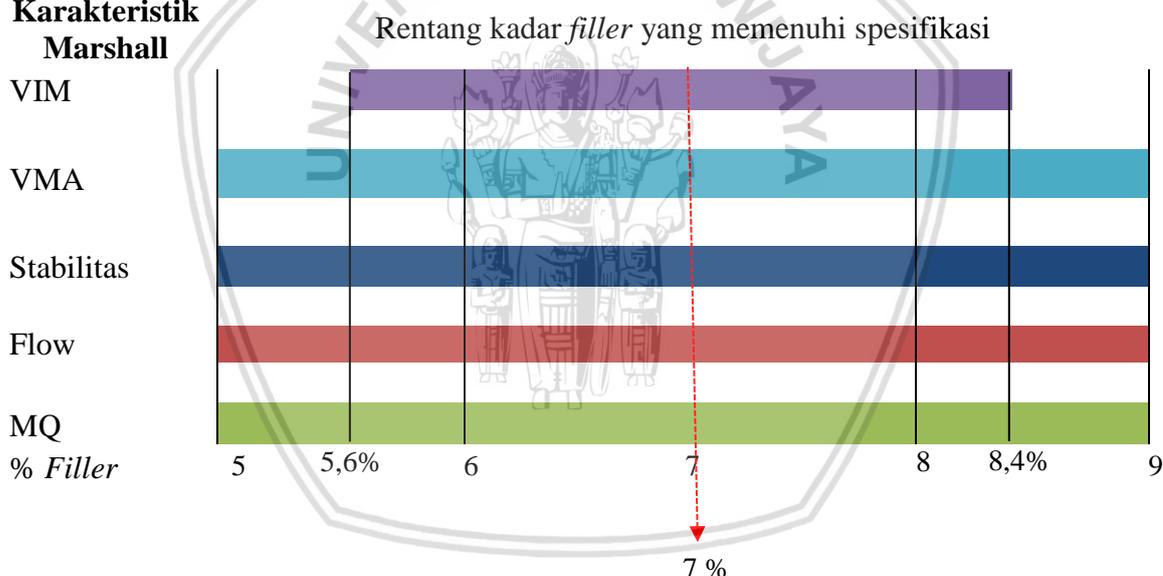
- 1) Grafik hubungan antara VIM (%) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = -0.0922x^2 + 0.5731x + 4.7186$ dengan nilai y minimum = 3%, dan y maksimum = 5% sehingga didapat nilai x minimum 5.6% dan x maksimum 8.4%.
- 2) Grafik hubungan antara VMA (%) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = -0.0381x^2 + 0.2312x + 19.463$ dengan nilai y minimum 15% sehingga didapat nilai x minimum 5% dan x maksimum 9%.
- 3) Grafik hubungan antara Stabilitas (Kg) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = -29.534x^2 + 420.7x - 171.63$ dengan nilai y minimum 800kg sehingga didapat nilai x minimum 5% dan x maksimum 9%.
- 4) Grafik hubungan antara Flow (mm) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = 0.0143x^2 - 0.288x + 5.0034$ dengan nilai y minimum 2 mm,

dan y maksimum = 4 mm sehingga didapat nilai x minimum 5% dan x maksimum 9%.

- 5) Grafik hubungan antara MQ (Kg/mm) dengan kadar aspal (%) mempunyai persamaan regresi $y = -9.2039x^2 + 138.58x - 158.94$ dengan nilai y minimum 250kg/mm sehingga didapat nilai x minimum 5% dan x maksimum 9%.
- 6) Persentase kadar aspal yang diperoleh dari grafik 5.7. sampai 5.11. diplotkan dalam suatu diagram pita metode bina marga yang berguna untuk memperoleh besarnya kadar aspal optimum. Kadar campuran optimum diperoleh dengan mengambil beberapa indikator *marshall* antara lain stabilitas, *flow*, *marshall quotient*, *VMA* dan *VIM* yang memenuhi syarat dan diambil nilai yang paling ideal. Kadar campuran optimum dari pengujian ini adalah pada kadar 7 % untuk lebih lengkapnya dapat dilihat dalam Gambar 5.12. Kadar campuran optimum =

$$\frac{5.6+8.4}{2} = 7 \%$$

Karakteristik Marshall

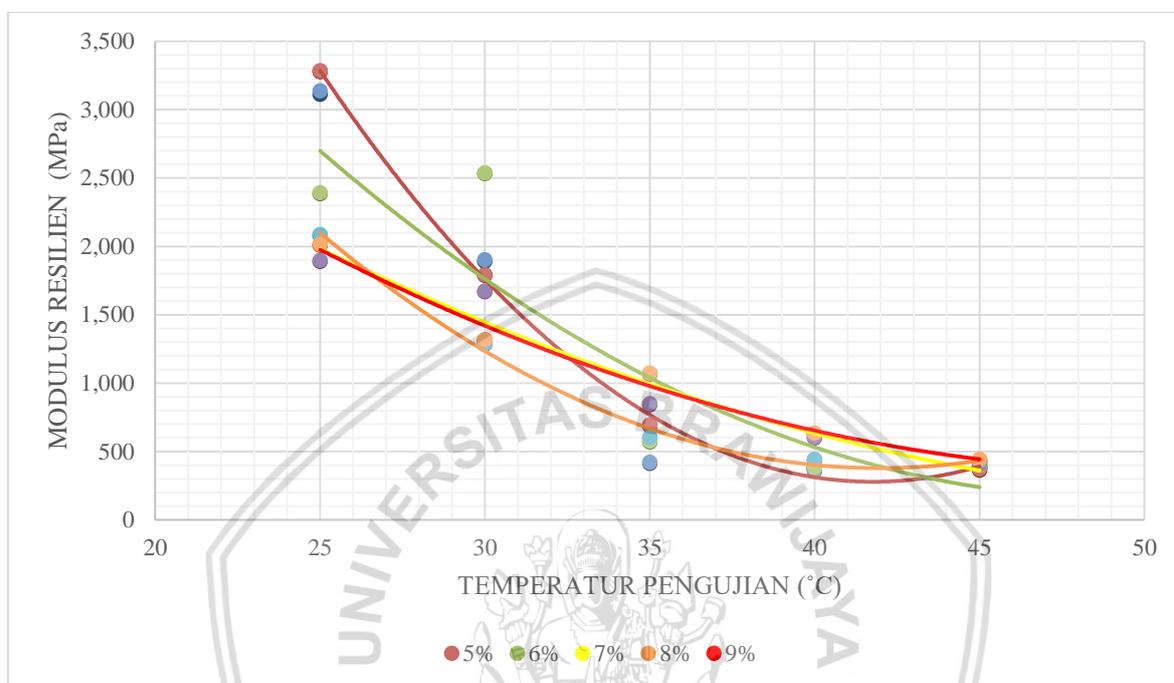


Gambar 5.12. Kadar Campuran Optimum

Pada gambar 5.12. terlihat nilai untuk keseluruhan benda uji penelitian yang memenuhi persyaratan dari Bina Marga terdapat pada kadar *filler* 5%, 6%, 7%, 8% dan 9% untuk beberapa parameter *marshall* yaitu stabilitas, *flow*, *VIM*, dan *VMA*. Sedangkan parameter *VIM* ada 2 benda uji yang tidak memenuhi persyaratan dari Bina Marga yaitu pada kadar aspal 5% dan 9%. Sehingga dari benda uji yang memenuhi persyaratan diambil garis tengah yang akan digunakan sebagai kadar campuran optimum.

5.6 Hasil Uji Modulus Resilien Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC – WC) Dengan Variasi Kadar *Filler Fly Ash*

Pengujian dengan alat *UMATTA* yang telah dilakukan memperoleh parameter yaitu modulus resilien yang akan ditampilkan dalam bentuk grafik di bawah ini:



Gambar 5.13. Hubungan Antara Temperatur Pengujian dengan Modulus Resilien

Pada Gambar 5.13. terlihat bahwa nilai modulus resilien akan semakin menurun jika temperatur pengujian ditambah. Nilai modulus resilien tertinggi pada kadar *filler fly ash* 5% dengan nilai sebesar 3.283 MPa pada temperatur 25°C, sedangkan pada temperatur pengujian yang sama nilai terendah pada kadar *filler fly ash* 7% dengan nilai sebesar 1.895 Mpa.

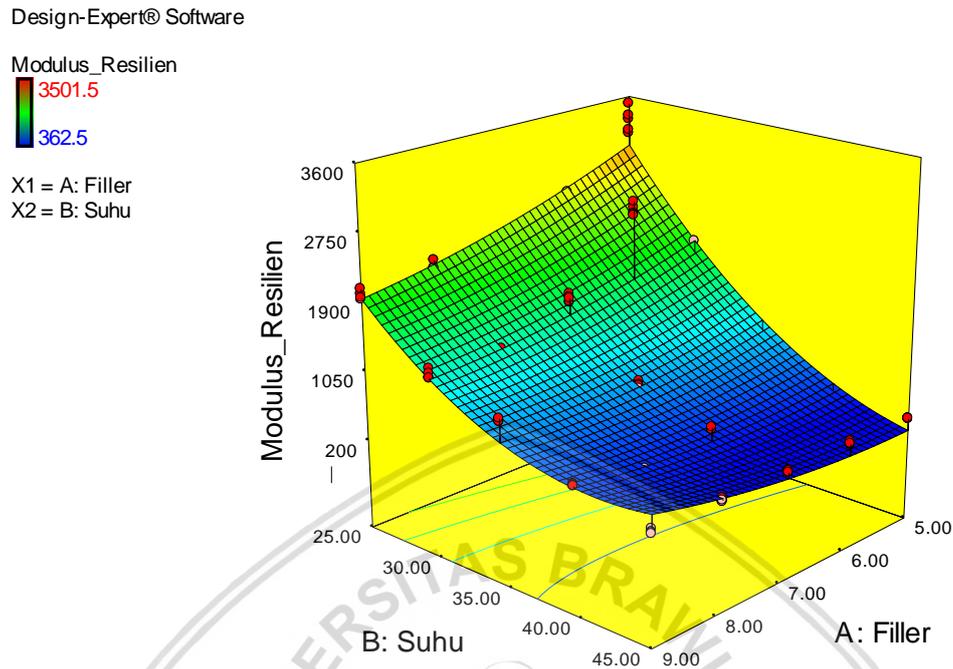
5.6.1 Uji Statistik Pengaruh Modulus Resilien Terhadap Kadar Campuran Dengan Variasi Kadar *Filler Fly Ash*

Persamaan yang didapatkan untuk menentukan nilai modulus resilien berdasarkan kadar *filler* (x_1) dan *temperatur* (x_2) adalah sebagai berikut

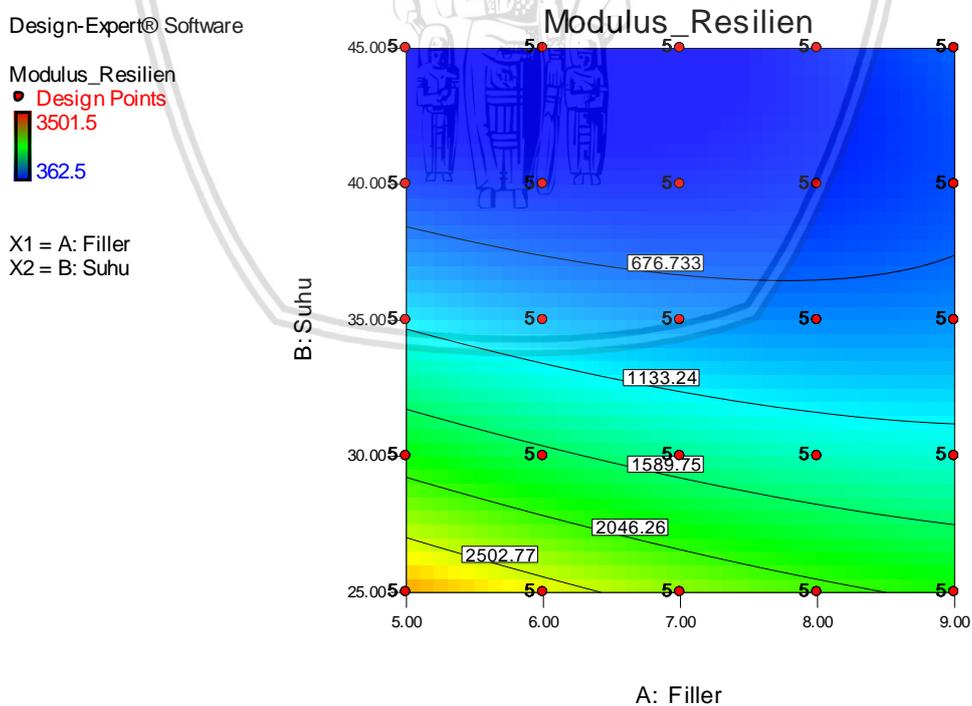
$$\begin{aligned} \text{Modulus resilien} = & 16755.8694 - 1091.65 x_1 - 575.78 x_2 + 17.5884 x_1 x_2 \\ & + 28.9714 x_1^2 + 5.0133 x_2^2 \end{aligned}$$

Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung nilai modulus resilien optimum berdasarkan kadar *filler* dan *temperatur*. Grafik 3 dimensi dan grafik kontur yang

dihasilkan berdasarkan persamaan diatas ditunjukkan secara berturut-turut pada Gambar 5.14. dan Gambar 5.15.



Gambar 5.14. Grafik 3D Modulus Resilien Berdasarkan Kadar *Filler* dan *Temperatur*



Gambar 5.15. Grafik 3D Modulus Resilien Berdasarkan Kadar *Filler* dan *Temperatur*

Berdasar grafik kontur tersebut maka didapat 4 solusi kombinasi perlakuan yang menghasilkan modulus resilien optimum. Kriteria pemilihan modulus resilien yang optimum dilihat dari nilai desirability yang mendekati 1.

Tabel 5.5. Nilai Desirability dari Kombinasi Perlakuan

| No | Filler | Temperatur | Modulus Resilien | Desirability |
|----|--------|------------|------------------|--------------|
| 1 | 5 | 25 | 2959.275 | 0.827262 |
| 2 | 5.03 | 25 | 2949.086 | 0.824016 |
| 3 | 8.46 | 25 | 2053.356 | 0.538661 |
| 4 | 8.6 | 25 | 2030.791 | 0.531472 |

Berdasarkan Tabel 5.5. kombinasi perlakuan yang menghasilkan nilai desirability mendekati 1 adalah pada kadar *filler* 5% dan *temperatur* 25⁰C. hasil sesuai dengan yang terlihat dari grafik 3D. pada Gambar 5.14. dapat dilihat bahwa modulus resilien tertinggi terjadi pada kadar *filler* 5% dan *temperatur* 25⁰C.

Tabel 5.6. Tabel ANOVA Modulus Resilien Berdasarkan Kadar *Filler* dan Temperatur

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|-----------------------------------|----------------------------|-----|---------------|------------|------|
| Corrected Model | 115527546.580 ^a | 33 | 3500834.745 | 2635.802 | .000 |
| Intercept | 200859832.860 | 1 | 200859832.860 | 151228.709 | .000 |
| Kelompok | 162457.240 | 4 | 40614.310 | 30.579 | .000 |
| <i>Filler</i> | 2060319.420 | 5 | 412063.884 | 310.246 | .000 |
| <i>Temperatur</i> | 99484534.240 | 4 | 24871133.560 | 18725.642 | .000 |
| <i>Filler</i> * <i>Temperatur</i> | 13820235.680 | 20 | 691011.784 | 520.267 | .000 |
| Error | 154069.560 | 116 | 1328.186 | | |
| Total | 316541449.000 | 150 | | | |
| Corrected Total | 115681616.140 | 149 | | | |

Berdasarkan tabel 5.6. semua signifikansinya kurang dari 0.05 sehingga dapat diperoleh informasi:

1. Setiap pukulan (*pulse*) yang dilakukan menghasilkan nilai modulus resilien yang berbeda
2. Persentase kadar *filler* yang digunakan menghasilkan modulus resilien yang berbeda
3. *Temperatur* yang digunakan menghasilkan modulus resilien yang berbeda
4. Interaksi antara kadar *filler* dan *temperatur* menghasilkan modulus resilien yang berbeda

Tabel 5.7. Uji Normalitas Sisaan

| | | Residual for Modulus_resilien |
|----------------------------------|----------------|----------------------------------|
| N | | 125 |
| Normal Parameters ^{a,b} | Mean | .0000 |
| | Std. Deviation | 31.50550 |
| Most Extreme Differences | Absolute | .130 |
| | Positive | .130 |
| | Negative | -.107 |
| Kolmogorov-Smirnov Z | | 1.448 |
| Asymp. Sig. (2-tailed) | | .030 |

Pada analisis ragam dua arah faktorial menghasilkan sisaan yang menyebar normal hal ini terlihat dari signifikansinya lebih dari 0.01.

Untuk mengetahui pada taraf mana yang berbeda maka dilakukan uji perbandingan berganda. Dalam hal ini uji perbandingan berganda dilakukan 3 kali, yakni pada kadar *filler*, *temperatur* dan kombinasi antara kadar *filler* dan *temperatur*. Kadar *filler* dan *temperatur* menggunakan uji BNT dan *temperatur* menggunakan uji Duncan.

Tabel 5.8. Uji BNT Modulus Resilien Berdasarkan Kadar *Filler*

| (I) Filler | (J) Filler | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|------------|------------|--------------------------|------------|------|-------------------------|-------------|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 5.00 | 6.00 | 49.0400 [*] | 10.12760 | .000 | 28.9369 | 69.1431 |
| | 7.00 | 219.4800 [*] | 10.12760 | .000 | 199.3769 | 239.5831 |
| | 8.00 | 335.6000 [*] | 10.12760 | .000 | 315.4969 | 355.7031 |
| | 9.00 | 209.0000 [*] | 10.12760 | .000 | 188.8969 | 229.1031 |
| 6.00 | 5.00 | -49.0400 [†] | 10.12760 | .000 | -69.1431 | -28.9369 |
| | 7.00 | 170.4400 [*] | 10.12760 | .000 | 150.3369 | 190.5431 |
| | 8.00 | 286.5600 [*] | 10.12760 | .000 | 266.4569 | 306.6631 |
| | 9.00 | 159.9600 [*] | 10.12760 | .000 | 139.8569 | 180.0631 |
| 7.00 | 5.00 | -219.4800 [†] | 10.12760 | .000 | -239.5831 | -199.3769 |
| | 6.00 | -170.4400 [†] | 10.12760 | .000 | -190.5431 | -150.3369 |
| | 8.00 | 116.1200 [*] | 10.12760 | .000 | 96.0169 | 136.2231 |
| | 9.00 | -10.4800 | 10.12760 | .303 | -30.5831 | 9.6231 |
| 8.00 | 5.00 | -335.6000 [†] | 10.12760 | .000 | -355.7031 | -315.4969 |
| | 6.00 | -286.5600 [†] | 10.12760 | .000 | -306.6631 | -266.4569 |
| | 7.00 | -116.1200 [†] | 10.12760 | .000 | -136.2231 | -96.0169 |
| | 9.00 | -126.6000 [†] | 10.12760 | .000 | -146.7031 | -106.4969 |
| 9.00 | 5.00 | -209.0000 [†] | 10.12760 | .000 | -229.1031 | -188.8969 |
| | 6.00 | -159.9600 [†] | 10.12760 | .000 | -180.0631 | -139.8569 |
| | 7.00 | 10.4800 | 10.12760 | .303 | -9.6231 | 30.5831 |
| | 8.00 | 126.6000 [*] | 10.12760 | .000 | 106.4969 | 146.7031 |

Berdasarkan tabel 5.8. semua *p-value* pada setiap *filler* kurang dari 0.05 dapat disimpulkan bahwa masing – masing perlakuan kadar *filler* menghasilkan nilai modulus resilien yang berbeda – beda. Kecuali untuk kadar *filler* 7% dan 9% dimana nilai *p-value* lebih dari 0.05.

Tabel 5.9. Uji BNT Modulus Resilien Berdasarkan Temperatur

| (I) Suhu | (J) Suhu | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|----------|----------|--------------------------|------------|------|-------------------------|-------------|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound |
| 25.00 | 30.00 | 612.2800* | 10.12760 | .000 | 592.1769 | 632.3831 |
| | 35.00 | 1575.6800* | 10.12760 | .000 | 1555.5769 | 1595.7831 |
| | 40.00 | 1844.8800* | 10.12760 | .000 | 1824.7769 | 1864.9831 |
| | 45.00 | 1926.6800* | 10.12760 | .000 | 1906.5769 | 1946.7831 |
| 30.00 | 25.00 | -612.2800* | 10.12760 | .000 | -632.3831 | -592.1769 |
| | 35.00 | 963.4000* | 10.12760 | .000 | 943.2969 | 983.5031 |
| | 40.00 | 1232.6000* | 10.12760 | .000 | 1212.4969 | 1252.7031 |
| | 45.00 | 1314.4000* | 10.12760 | .000 | 1294.2969 | 1334.5031 |
| 35.00 | 25.00 | -1575.6800* | 10.12760 | .000 | -1595.7831 | -1555.5769 |
| | 30.00 | -963.4000* | 10.12760 | .000 | -983.5031 | -943.2969 |
| | 40.00 | 269.2000* | 10.12760 | .000 | 249.0969 | 289.3031 |
| | 45.00 | 351.0000* | 10.12760 | .000 | 330.8969 | 371.1031 |
| 40.00 | 25.00 | -1844.8800* | 10.12760 | .000 | -1864.9831 | -1824.7769 |
| | 30.00 | -1232.6000* | 10.12760 | .000 | -1252.7031 | -1212.4969 |
| | 35.00 | -269.2000* | 10.12760 | .000 | -289.3031 | -249.0969 |
| | 45.00 | 81.8000* | 10.12760 | .000 | 61.6969 | 101.9031 |
| 45.00 | 25.00 | -1926.6800* | 10.12760 | .000 | -1946.7831 | -1906.5769 |
| | 30.00 | -1314.4000* | 10.12760 | .000 | -1334.5031 | -1294.2969 |
| | 35.00 | -351.0000* | 10.12760 | .000 | -371.1031 | -330.8969 |
| | 40.00 | -81.8000* | 10.12760 | .000 | -101.9031 | -61.6969 |

Berdasarkan tabel 5.9. semua *p-value* pada setiap suhu kurang dari 0.05 dapat disimpulkan bahwa masing – masing perlakuan suhu menghasilkan nilai modulus resilien yang berbeda – beda.

Tabel 5.10. Uji Duncan pada Kombinasi Antara Kadar *Filler* dan Temperatur

| Filler (%) | Temperatur (°C) | Rata – rata (MPa) | |
|------------|-----------------|-------------------|--|
| 5 | 45 | 370 | |
| 6 | 40 | 379 | |
| 5 | 40 | 381 | |
| 6 | 45 | 393 | |
| 7 | 45 | 401 | |
| 8 | 45 | 426 | |
| 9 | 45 | 439 | |
| 8 | 40 | 441 | |
| 6 | 35 | 574 | |
| 8 | 35 | 600 | |
| 7 | 40 | 604 | |
| 9 | 40 | 632 | |
| 5 | 35 | 693 | |
| 7 | 35 | 847 | |
| 9 | 35 | 1071 | |
| 8 | 30 | 1287 | |
| 9 | 30 | 1317 | |
| 7 | 30 | 1672 | |
| 5 | 30 | 1791 | |
| 7 | 25 | 1895 | |
| 9 | 25 | 2012 | |
| 8 | 25 | 2084 | |
| 6 | 25 | 2389 | |
| 6 | 30 | 2536 | |
| 5 | 25 | 3283 | |

Berdasarkan tabel 5.10. kombinasi *filler* dan suhu yang menghasilkan nilai modulus resilien tertinggi pada *filler* 5% dan suhu 25°C, modulus resilien pada kombinasi perlakuan ini berbeda dengan kombinasi perlakuan yang lain.

Kombinasi perlakuan filler 8% 30°C dan 9% 30°C menghasilkan modulus resilien yang sama hal ini dapat dilihat pada tabel dimana pada kolom terakhir terdapat garis lurus yang menghubungkan masing – masing perlakuan yang menyatakan bahwa antara garis satu ke garis yang lain memiliki nilai yang hampir sama atau tidak ada perbedaan.

5.7 Rasio Hubungan Modulus Resilien Terhadap Karakteristik Marshall

Pengujian yang telah dilakukan memperoleh parameter *marshall* yaitu stabilitas. Pengujian alat UMATTA menghasilkan nilai dari modulus resilien. Hasil analisis perhitungan dari parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.11. dan Tabel 5.12.

Tabel 5.11. Hasil Pengujian Dengan Alat UMATTA

| Kadar | Suhu | Pulse | | | | | Rata-rata |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| | | Pulse 1 | Pulse 2 | Pulse 3 | Pulse 4 | Pulse 5 | |
| % | °C | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa |
| 5% | 25 | 3.502 | 3.346 | 3.299 | 3.155 | 3.114 | 3.283 |
| | 30 | 1.889 | 1.799 | 1.769 | 1.762 | 1.734 | 1.791 |
| | 35 | 744 | 716 | 672 | 677 | 658 | 693 |
| | 40 | 403 | 384 | 381 | 375 | 363 | 381 |
| | 45 | 374 | 373 | 371 | 366 | 367 | 370 |
| 6% | 25 | 2.557 | 2.388 | 2.363 | 2.328 | 2.311 | 2.389 |
| | 30 | 2.651 | 2.574 | 2.499 | 2.472 | 2.484 | 2.536 |
| | 35 | 623 | 566 | 583 | 552 | 547 | 574 |
| | 40 | 395 | 381 | 377 | 376 | 371 | 380 |
| | 45 | 422 | 393 | 387 | 388 | 379 | 393 |
| 7% | 25 | 2.022 | 1.893 | 1.865 | 1.854 | 1.842 | 1.895 |
| | 30 | 1.737 | 1.693 | 1.677 | 1.621 | 1.633 | 1.672 |
| | 35 | 903 | 859 | 841 | 827 | 807 | 847 |
| | 40 | 628 | 593 | 600 | 601 | 602 | 604 |
| | 45 | 424 | 412 | 392 | 393 | 387 | 401 |
| 8% | 25 | 2.182 | 2.085 | 2.070 | 2.051 | 2.035 | 2.084 |
| | 30 | 1.337 | 1.300 | 1.283 | 1.257 | 1.260 | 1.287 |
| | 35 | 649 | 599 | 594 | 584 | 575 | 600 |
| | 40 | 469 | 446 | 438 | 430 | 425 | 441 |
| | 45 | 454 | 435 | 425 | 414 | 406 | 426 |
| 9% | 25 | 2.095 | 2.033 | 1.984 | 1.984 | 1.967 | 2.012 |
| | 30 | 1.400 | 1.339 | 1.290 | 1.281 | 1.277 | 1.317 |
| | 35 | 1.100 | 1.059 | 1.058 | 1.083 | 1.057 | 1.071 |
| | 40 | 649 | 622 | 622 | 642 | 630 | 633 |
| | 45 | 477 | 438 | 437 | 427 | 417 | 439 |

(Sumber: Hasil Pengujian)

Untuk merubah satuan modulus resilien dari MPa ke Kg maka dibutuhkan konvesi sebagai berikut:

$$\text{MPa} \gg \text{Kg/mm} = 0,10197$$

$$\text{Diamter BU} = 101,50 \text{ mm}$$

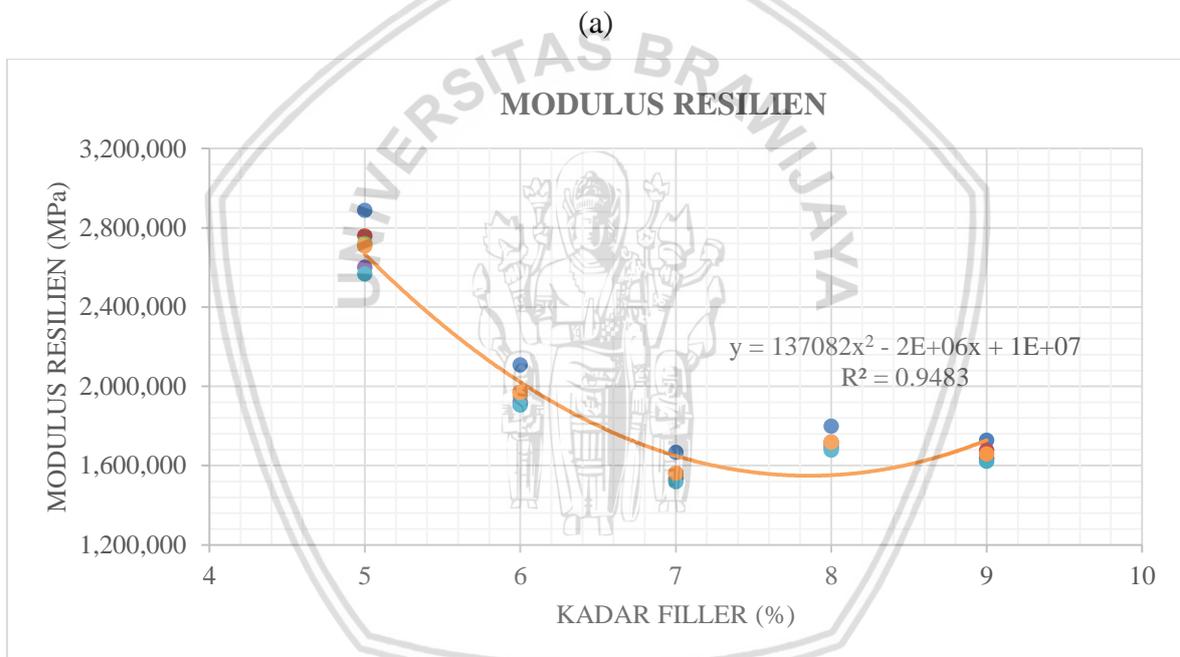
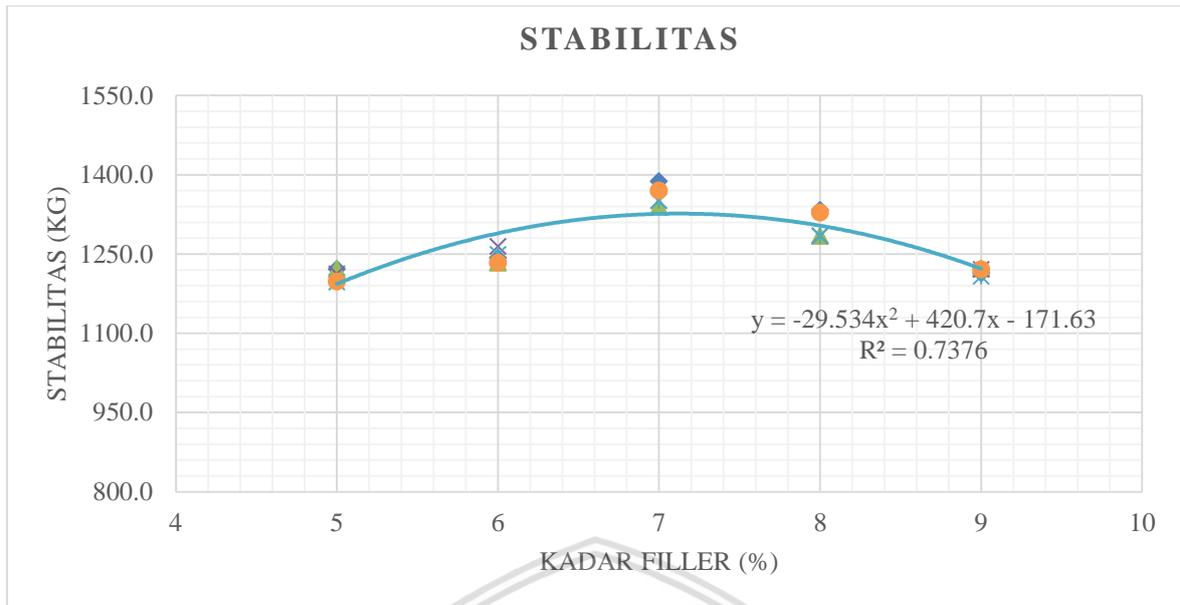
$$\text{Luasan (A)} = 3,14 \times r^2 = 3,14 \times 101,50^2 = 8087,27 \text{ mm}$$

$$\text{Contoh} = 3502 \times 0,10197 \times 8087,27 = 2.887.542 \text{ kg}$$

Tabel 5.12. Hasil Pengujian Dengan Alat UMATTA

| Kadar | Suhu | Pulse | | | | | Rata-rata | Stabilitas |
|-------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | Pulse 1 | Pulse 2 | Pulse 3 | Pulse 4 | Pulse 5 | | |
| % | °C | Kg |
| 5% | 25 | 2.887.542 | 2.758.895 | 2.720.136 | 2.601.385 | 2.567.574 | 2.707.106 | 1.222 |
| | 30 | 1.557.780 | 1.483.561 | 1.458.821 | 1.453.048 | 1.429.958 | 1.476.633 | 1.222 |
| | 35 | 613.134 | 590.043 | 553.758 | 557.882 | 542.213 | 571.405 | 1.213 |
| | 40 | 331.925 | 316.257 | 313.783 | 308.835 | 298.939 | 313.947 | 1.197 |
| | 45 | 308.010 | 307.185 | 305.536 | 301.413 | 302.237 | 304.876 | 1.198 |
| 6% | 25 | 2.108.240 | 1.968.872 | 1.948.256 | 1.919.393 | 1.905.374 | 1.970.026 | 1.243 |
| | 30 | 2.186.170 | 2.122.671 | 2.060.822 | 2.038.556 | 2.048.452 | 2.091.334 | 1.234 |
| | 35 | 513.350 | 466.344 | 480.364 | 454.799 | 450.676 | 473.106 | 1.265 |
| | 40 | 325.328 | 313.783 | 310.484 | 309.659 | 305.536 | 312.957 | 1.249 |
| | 45 | 347.594 | 323.678 | 318.731 | 319.555 | 312.133 | 324.338 | 1.234 |
| 7% | 25 | 1.667.047 | 1.560.666 | 1.537.576 | 1.528.505 | 1.518.609 | 1.562.480 | 1.388 |
| | 30 | 1.432.432 | 1.396.147 | 1.382.952 | 1.336.771 | 1.346.667 | 1.378.994 | 1.341 |
| | 35 | 744.254 | 707.969 | 693.126 | 681.580 | 665.087 | 698.403 | 1.351 |
| | 40 | 517.473 | 488.610 | 494.383 | 495.207 | 496.032 | 498.341 | 1.351 |
| | 45 | 349.243 | 339.347 | 322.854 | 323.678 | 318.731 | 330.770 | 1.370 |
| 8% | 25 | 1.798.993 | 1.719.001 | 1.706.631 | 1.690.962 | 1.677.768 | 1.718.670 | 1.333 |
| | 30 | 1.102.568 | 1.072.056 | 1.058.037 | 1.036.596 | 1.039.070 | 1.061.665 | 1.284 |
| | 35 | 534.791 | 493.558 | 489.435 | 481.188 | 473.766 | 494.547 | 1.284 |
| | 40 | 386.353 | 367.385 | 360.788 | 354.191 | 350.068 | 363.756 | 1.284 |
| | 45 | 373.983 | 358.314 | 350.068 | 340.996 | 334.399 | 351.551 | 1.328 |
| 9% | 25 | 1.727.247 | 1.676.118 | 1.635.710 | 1.635.710 | 1.621.691 | 1.659.295 | 1.213 |
| | 30 | 1.154.522 | 1.104.218 | 1.063.810 | 1.056.388 | 1.053.089 | 1.086.405 | 1.223 |
| | 35 | 906.712 | 872.901 | 872.076 | 892.693 | 871.252 | 883.126 | 1.221 |
| | 40 | 534.791 | 512.525 | 512.525 | 529.018 | 519.123 | 521.596 | 1.207 |
| | 45 | 392.950 | 360.788 | 359.963 | 351.717 | 343.470 | 361.777 | 1.221 |

(Sumber: Hasil Pengujian)



(b)

Gambar 5.16. Hubungan Modulus Resilien Terhadap Stabilitas Marshall (a) Stabilitas (b) Modulus Resilien

Dilihat pada Gambar 5.16. (a) Dengan penambahan kadar *filler* maka nilai deformasi campuran aspal akan semakin tinggi. Kadar *filler* 7% merupakan kadar optimum campuran aspal dengan penggantian *filler fly ash*. Maka diketahui bahwa nilai stabilitas tertinggi pada kadar *filler* 7% dengan nilai sebesar 1.326 Kg. Gambar 5.16. (b) menjelaskan bahwa nilai modulus resilien optimum pada kadar *filler* 5% dan dengan nilai sebesar 2.707.106

Kg. Dengan penggantian kadar *filler fly ash* maka nilai modulus resilien mengalami penurunan seperti yang terlihat pada Gambar 5.16. (b) yang semakin menurun.

Jadi hubungan parameter *marshall* dengan modulus resilien jika dilihat dari grafik menyatakan bahwa hubungan diantara kedua parameter tersebut berbanding terbalik. Hal ini dapat dilihat dimana nilai optimum parameter stabilitas pada kadar *filler* 5% dengan nilai 1,197 Kg sedangkan pada parameter modulus resilien pada kadar *filler* 5% dengan nilai sebesar 2.707.106 Kg. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa perkerasan yang memiliki nilai stabilitas tinggi menjadikan perkerasan lebih kaku tetapi kemampuan deformasi balik rendah. Sebaliknya jika nilai stabilitas rendah menjadikan perkerasan lebih lentur sehingga deformasi balik menjadi tinggi. Hal ini membuktikan bahwa stabilitas dan modulus resilien memiliki hubungan kuat.

5.8 Pembahasan

Penelitian yang dilakukan oleh Aldian (2014) menyatakan bahwa campuran aspal porous dengan penggunaan aspal pen 60/70 mempunyai nilai modulus resilien sebesar 1.042 MPa pada saat pengujian di temperatur 25°C. Hal ini membuktikan bahwa beton aspal lapis dengan penggunaan *fly ash* sebagai *filler* masih lebih baik jika dilihat dari hasil pengujian. Dimana pada Gambar 5.13. terlihat bahwa nilai modulus resilien pada kadar *filler fly ash* 5% dengan nilai sebesar 3.283 MPa pada temperatur 25°C. Perbedaan jenis campuran aspal sangat mempengaruhi nilai modulus resilien, dimana spesifikasi campuran aspal porous identik dengan nilai stabilitas *marshall* yang lebih rendah dan *VIM* yang sangat besar sehingga memiliki banyak rongga pada campuran. Sehingga dapat dikatakan bahwa campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) lebih baik dibandingkan dengan campuran aspal porous jika dilihat dari nilai hasil pengujian.

Wiyono (2012) melakukan penelitian terhadap campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dengan penambahan *filler* kapur. Penelitian yang dilakukan mempunyai kesimpulan bahwa semakin ditambahkan kadar kapur maka campuran aspal menjadi lentur hal ini dikarenakan semakin ditambahkan *filler* kapur nilai modulus resilien semakin menurun. Nilai modulus resilien tertinggi terjadi pada kadar *filler* kapur 0% dengan temperatur pengujian 20°C yaitu sebesar 792,42 MPa. Hal ini membuktikan bahwa beton aspal lapis dengan penggunaan *fly ash* sebagai *filler* masih lebih baik jika dilihat dari hasil pengujian. Dimana pada Gambar 5.13. terlihat bahwa nilai modulus resilien pada kadar *filler fly ash* 5% dengan nilai sebesar 3.283 MPa pada temperatur 25°C. Dengan penggantian *filler fly ash* maka campuran menjadi semakin kaku sehingga tahan akan deformasi jika terjadi pembebanan.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Kadar Aspal Optimum (KAO) untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) ditinjau dari uji *marshall* sebesar 5,5% dengan nilai VIM sebesar 3.70%, VMA sebesar 19,00%, Stabilitas sebesar 1.152,93 Kg, Flow sebesar 2,78 mm dan MQ sebesar 417,39 Kg/mm.
- 2) Kadar campuran optimum penggunaan *fly ash* sebagai *filler* untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) ditinjau dari uji *marshall* sebesar 7% dengan nilai VIM sebesar 4,21%, VMA sebesar 19,21%, Stabilitas sebesar 1326.10 Kg, Flow sebesar 3,69 mm dan MQ sebesar 360.13 Kg/mm.
- 3) Kadar campuran optimum penggunaan *fly ash* sebagai *filler* untuk campuran beton aspal lapis aus (AC-WC) ditinjau dari uji *UMATTA* sebesar 5% dan temperatur 25°C dengan nilai sebesar 2.707.106 Kg.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Persamaan pada gambar 3D, *filler* dan temperatur terhadap nilai modulus resilien beton aspal hanya berlaku untuk campuran aspal beton lapis aus (AC-WC). Akan tetapi karena persamaan yang dihasilkan berasal dari pengujian terhadap 2 benda uji untuk setiap *filler* dan temperatur benda uji AC-WC, maka perlu divalidasi lagi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak agar syarat statistik bisa dipenuhi.
- 2) Jika dilakukan pengujian pengaruh *filler* dan temperatur terhadap modulus resilien dengan *fly ash* sebagai *filler* maka disarankan menggunakan suhu/ temperatur yang sama baik pada saat pengujian *marshall* maupun *UMATTA* agar diperoleh hasil pengujian yang mempunyai nilai korelasi kuat pada masing – masing parameter metode uji tersebut.

- 3) Jika dilakukan pengujian pengaruh *filler* dan temperatur terhadap modulus resilien dengan *fly ash* sebagai *filler* maka disarankan menggunakan campuran aspal beton lapis pengikat (*AC-BC*) sehingga dapat melihat mengetahui pengaruh modulus resilien pada campuran aspal beton lapis pengikat (*AC-BC*).



DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. Guide for Design of Pavement Structure. Washington D.C.: AASHTO, 1993.
- AASHTO T 307. Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. 2005.
- Akem. Pengaruh Suhu Pemasakan pada Lapis Perkerasan Laston (HRC-WC) yang Menggunakan Bahan Pengikat Retona Blend 55. Jurnal Teknik Sipil UNTAN 12 (2): 285-302, 2012.
- Ambarwati, Lasmini, Muhammad Zainul Arifin, dan Heru Bawono. Pengaruh Kadar Abu Batubara Sebagai Filler Terhadap Karakteristik Dan Indeks Kekuatan Sisa (IKS) Pada Campuran Hot Rolled Sheet (HRS). Jurnal Rekayasa Sipil Vol. 3 (II), 2009.
- Ari, Adi S. Penggunaan Abu Batubara Hasil Pembakaran Asphalt Mixing Plant (AMP) Sebagai Bahan Campuran Lapis Aspal Beton (Laston). Badan Penelitian dan Pengembangan Provinsi Kalimantan Timur, 2017.
- Bazin, P. , dan J. Saunier. Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes. Proceeding International Conference Structural Design Asphalt Pavement, 1994.
- Bejarano, MO, dan MR Thompson. Subgrade soil evaluation for the design of airport flexible pavements. Technical Report, DOT 95-C-001, Federal Aviation Administration, 1999.
- Brown, S. The Shell Bitumen Handbook. Shell Bitumen U.K., 1990.
- Departemen Pekerjaan Umum. Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal Panas Dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak. Jakarta: PT. Mediatama Saptakarya, 1999.
- _____. Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton (Laston) Untuk Jalan Raya. 1987.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah . Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Pt T-01-2002-B. Bandung: Pusat Litbang Teknologi Prasarana Transportasi, 2002.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton (Laston). 1981.
- Haitamy, Hilal, dan Neny Noviyati Fendi. Penggantian Kadar Abu Batubara Sebagai Filler Dan Variasi Temperatur Pemasakan Terhadap Karakteristik Dan Indeks Kekuatan

- Sisa (IKS) Campuran Aspal Beton (LASTON). Universitas Brawijaya Malang, 2007.
- Haryanto, Aschuri D., dan Yamin I. R.A. Temperature and Time Loading Influence on Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Mixture and Design Life by Using Analytical Method on Indonesian Tropical Condition. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, October, 2003, 2003.
- Hicks, RG, dan CL Monismith. Factors influencing the resilient response of granular materials. HRB, 345, p.15, 1971.
- Huang, YH. Pavement analysis and design, 2 Edition. Pearson Prentice Hall, NJ, 2004.
- Kementrian PU Direktorat Jendral Bina Marga. Spesifikasi Umum revisi 3. 2010.
- Kreb, Robert D., dan Richard D. Walker. Highway Material. New York: McGrawHill, 1971.
- Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil. Panduan Praktikum Pemeriksaan dan Pengujian Bahan Perkerasan Jalan Raya. Semarang: Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, 1997.
- Lake, Aloysius Gregorius . Kinerja Campuran Split Mastic Asphalt Dengan Beberapa Material Dari Kalimantan. Universitas Brawijaya Malang, 2010.
- Mendenhall, W., dan Reinmuth J.E. Statistik untuk Manajemen dan Ekonomi. Jakarta: Erlangga, 1982.
- Mia. Pemanfaatan Abu Batubara. (online), (<http://mheeanck.blogspot.com/2011/01/pemanfaatan-abu-batubara.html>), diakses 24 Juli 2014, 2011.
- Mohammad, LN, AJ Puppala, dan P Alawilli. Influence of testing procedure and LVDT location on resilient modulus of soils. TRR 1462, 1994.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Phase 2, 2004.
- Nugroho, Eko Hindaryanto. Analisis Porositas dan Permeabilitas Beton dengan Bahan Tambah Fly Ash untuk Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). Surakarta: Universitas Sebelas Maret, 2010.
- Nurchahya, Aldian. Analisis Kinerja Campuran Aspal Porus Menggunakan Aspal Pen 60/70 Dan Aspal Modifikasi Polimer Elvaloy. Bandung: ITB, 2014.

- Pratomo, P. Campuran Hot Rolled Sheet Dengan Berbagai Jenis Filler. Prosiding Simposium I Studi Transportasi Perguruan Tinggi Bandung: Institut Teknik Bandung, 1999.
- Puppala, AJ. Estimating stiffness of subgrade and unbound materials for pavement design. NCHRP Synthesis 382, TRB, 2008.
- Putrowijoyo, Rian. Kajian Laboratorium Sifat Marshall dan Durabilitas Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) Dengan Membandingkan Penggunaan Antara Semen Portland dan Abu Batu Sebagai Filler. Semarang: Universitas Diponegoro, 2006.
- Seed, HC, Chan, CK., & Lee, CE., Resilient characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. Proc. Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements University of Michigan, 1962.
- South African National Road Agency Limited (SANRAL). Framework for a highway planning system. Integration of the pavement design method and a highway planning system. Report No. PB/2007/HPS, 2008.
- Sudjatmiko. Karakteristik Modulus Lapis Aspal Untuk Kondisi Temperatur Indonesia. Institut Teknologi Bandung: Tesis Program Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Program Pascasarjana, 1999.
- Suharto, Ign, dan dkk. Perekayasaan Metodologi Penelitian. Yogyakarta: Andi Offset, 2004.
- Sukirman, Silvia. Beton Aspal Campuran Panas. Jakarta: Granit, 2003.
- _____. Perkerasan Lentur Jalan Raya. Bandung: Nova, 1995.
- _____. Rekayasa Jalan II. Bandung: Nova, 1999.
- Syarwan. Kajian Variasi Suhu Pematatan pada Beton Aspal Menggunakan Aspal Retona Blend 55. Jurnal Portal, 4 (1): 1-10, 2012.
- Tahir, Anas. Karakteristik Campuran Beton Aspal (AC-WC) dengan Menggunakan Variasi Kadar Filler Abu Terbang Batu Bara. Jurnal SMARTek, 7 (4): 256-278, 2009.
- Tahir, Anas, dan Setiawan Arief. Kinerja Durabilitas Campuran Beton Aspal Ditinjau dari Faktor Variasi Suhu Pematatan dan Lama Perendaman. Jurnal SMARTek, 7 (1): 46-61, 2009.
- Thompson, MR, dan QL Robnett. Resilient properties of subgrade soils. Transportation Engineering, ASCE, Vol. 105, No. TE1, 1979.
- Tm, Suprpto. Bahan dan Struktur Jalan Raya. Yogyakarta: Biro Penerbit KMTS FT UGM, 2004.
- Uzan, J. Characterization of granular materials. TRR 1022. p.52, 1985.

- Uzan, J, MW Witczak, T Scullion, dan RL Lytton. Development and validation of realistic pavement response models. Proc. 7 Int. Conf, Asphalt Pavements, Vol.1, p.334, 1992.
- Wardani, S.P.R. Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) Untuk Stabilisasi Tanah Maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya Dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan. Semarang: Universitas Diponegoro, 2008.
- Widodo, Sri. Pengaruh Berat Jenis Filler terhadap Karakteristik Campuran Split Mastic Asphalt. Prosiding Simposium III FSTPT, ISBN NO. 979-96241-0-X, 2000.
- Witczak, MW. Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. NCHRP Research results digest No. 285, 2004.
- Wiyono, Arselina Wood Ward. Pengaruh Suhu Terhadap Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC) Dengan Kapur Sebagai Filler. Jurnal Rekaya dan Manajemen Transportasi Volume II No. 2 Juli 2012, 2012.
- Yoder, E.J., dan M.W. Witczak. Principles of Pavement Design. New York USA: John Wiley & Sons, Inc., 1975.





Lampiran 1 Hasil Pengujian Agregat Kasar



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT KASAR

Kelompok : Tanggal : 30 April 2017
 Jurusan : Teknik Sipil Asisten :
 Universitas : Brawijaya

| No | Kegiatan | Sampel 1 | Sampel 2 |
|----|--|----------|----------|
| 1 | Mengukur berat sampel kering oven (B_k) | 5000 | 5000 |
| 2 | Mengukur berat sampel kering permukaan jenuh (B_j) | 5089.6 | 5088.5 |
| 3 | Mengukur berat sampel dalam air (B_a) | 3254 | 3230 |

| No | | Perhitungan | Sampel 1 | Sampel 2 | Rata-rata |
|----|------------|---------------------------|----------|----------|-----------|
| 1 | BJ Bulk | $\frac{B_k}{(B_j - B_a)}$ | 2.72 | 2.69 | 2.71 |
| 3 | BJ SSD | $\frac{B_j}{(B_j - B_a)}$ | 2.77 | 2.74 | 2.76 |
| 4 | BJ Semu | | 2.86 | 2.82 | 2.84 |
| 5 | Penyerapan | | 1.79 | 1.77 | 1.78 |



Lampiran 2 Hasil Pengujian Agregat Halus



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT HALUS

Kelompok : Tanggal : 30 April 2017
 Jurusan : Teknik Sipil Asisten :
 Universitas : Brawijaya

| No | Kegiatan | Sampel 1 | Sampel 2 |
|----|--|----------|----------|
| 1 | Mengukur berat sampel kering oven (B_k) | 488.40 | 487.30 |
| 2 | Mengukur berat sampel kering permukaan jenuh (B_j) | 500.00 | 500.00 |
| 3 | Mengukur berat pikno diisi air (B) | 702.20 | 714.60 |
| 4 | Mengukur berat pikno + benda uji ssd + air (B_t) | 1016.80 | 1029.20 |
| | | 314.60 | |

| No | Perhitungan | Sampel 1 | Sampel 2 | Rata-rata |
|----|-------------------------------|----------|----------|-----------|
| 1 | $\frac{B_k}{(B + 500 - B_t)}$ | 2.63 | 2.63 | 2.63 |
| 3 | $\frac{500}{(B + 500 - B_t)}$ | 2.70 | 2.70 | 2.70 |
| 4 | BJ Semu | 2.81 | 2.82 | 2.82 |
| 5 | Penyerapan | 2.38 | 2.61 | 2.49 |



Lampiran 3 Hasil Pengujian *Filler*

LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN FLY ASH

Kelompok : Tanggal : 30 April 2017
 Jurusan : Teknik Sipil Asisten :
 Universitas : Brawijaya

| No | Kegiatan | Sampel 1 | Sampel 2 |
|----|--|----------|----------|
| 1 | Mengukur berat sampel kering oven (B_k) | 500.00 | 500.00 |
| 2 | Mengukur berat sampel kering permukaan jenuh (B_j) | 500.00 | 500.00 |
| 3 | Mengukur berat pikno diisi air (B) | 677.60 | 677.60 |
| 4 | Mengukur berat pikno + benda uji ssd + air (B_t) | 970.80 | 969.70 |
| | | 293.20 | |

| No | Perhitungan | Sampel 1 | Sampel 2 | Rata-rata |
|----|-------------------------------|----------|----------|-----------|
| 1 | $\frac{B_k}{(B + 500 - B_t)}$ | 2.42 | 2.41 | 2.41 |
| 3 | BJ SSD | 2.42 | 2.41 | 2.41 |
| 4 | BJ Semu | 2.42 | 2.41 | 2.41 |



Lampiran 4 Hasil Pengujian Keausan Agregat



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

KEAUSAN AGREGAT
(Los Angeles Abrassion Test)

Kelompok :
 Jurusan : Teknik Sipil
 Universitas : Brawijaya

Tanggal : 27 April 2017
 Asisten :

500 Putaran

| Gradasi Pemeriksaan | | | | FRAKSI B (10 - 20 mm) | | | |
|---------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------------|---------|----------------|---------|
| Ukuran Saringan | | | | Berat Sampel 1 | | Berat Sampel 2 | |
| Lolos (mm) | Tertahan (mm) | Lolos (inch) | Tertahan (inch) | Sebelum | Sesudah | Sebelum | Sesudah |
| 76.2 | 63.5 | 3 | 2.5 | | | | |
| 63.5 | 50.8 | 2.5 | 2 | | | | |
| 50.8 | 38.1 | 2 | 1.5 | | | | |
| 38.1 | 25.4 | 1.5 | 1 | | | | |
| 25.4 | 19.1 | 1 | 3/4 | | | | |
| 19.1 | 13.2 | 3/4 | 1/2 | 2500 | | | |
| 13.2 | 9.6 | 1/2 | 3/8 | 2500 | | | |
| 9.6 | 6.35 | 3/8 | No. 4 | | | | |
| 6.35 | 4.75 | No. 4 | No. 6 | | | | |
| 4.75 | 2.38 | No. 6 | No. 8 | | | | |

| | | | |
|---------------------------------------|-------|--------|--|
| Berat sampel semula | a | 5000 | |
| Berat sampel tertahan saringan No. 12 | b | 4340,4 | |
| | a - b | 659.6 | |
| Keausan | | 13.192 | |
| Keausan rata - rata | | 13.192 | |



Lampiran 7 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

PENETRASI BAHAN BITUMEN

Kelompok :
 Jurusan : Teknik Sipil
 Universitas : Brawijaya

Tanggal : 27 April 2017
 Asisten :

| No | Kegiatan | Uraian | |
|----|---------------------------|---|---|
| 1 | Pembukaan contoh | Contoh dipanaskan Mulai jam = Selesai jam = | Pembacaan suhu oven = °C |
| 2 | Mendinginkan contoh | Didiamkan di suhu ruangan Mulai jam = Selesai jam = | |
| 3 | Mencapai suhu pemeriksaan | Direndam pada suhu 25°C Mulai jam = Selesai jam = | Pembacaan suhu waterbath = °C |
| 4 | Pemeriksaan | Penetrasi pada suhu 25°C Mulai jam = Selesai jam = | Pembacaan suhu penetrometer = °C |

| No | Penetrasi pada 25°C, 100 gr, 5 detik | Nilai | | |
|-------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| | | Sampel 1 | Sampel 2 | Sampel 3 |
| 1 | Pengataan 1 | 65 | 68 | 65 |
| 2 | Pengataan 2 | 65 | 69 | 66 |
| 3 | Pengataan 3 | 67 | 70 | 67 |
| Rata - rata | | 65.67 | 69.00 | 66.00 |



Lampiran 8 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPAL DAN TER

Kelompok :
 Jurusan : Teknik Sipil
 Universitas : Brawijaya

Tanggal : 28 April 2017
 Asisten :

| No | Kegiatan | Uraian | |
|----|---------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Pembukaan contoh | Contoh dipanaskan Mulai jam Selesai jam | Pembacaan suhu oven = °C |
| 2 | Mendinginkan contoh | Didiamkan di suhu ruangan Mulai jam Selesai jam | |
| 3 | Mencapai suhu pemeriksaan | Direndam pada suhu 5°C Mulai jam Selesai jam | Pembacaan suhu awal = °C |
| 4 | Pemeriksaan | Titik lembek Mulai jam Selesai jam | |

| No | Suhu yang diamati (°C) | Waktu (menit) | | | |
|----|------------------------|---------------|-------|---|----|
| | | I | II | I | II |
| 1 | 5 | 0.00 | 0.00 | | |
| 2 | 10 | 3.42 | 3.42 | | |
| 3 | 15 | 5.08 | 5.08 | | |
| 4 | 20 | 6.38 | 6.38 | | |
| 5 | 25 | 7.59 | 7.59 | | |
| 6 | 30 | 9.14 | 9.14 | | |
| 7 | 35 | 10.25 | 10.25 | | |
| 8 | 40 | 11.54 | 11.54 | | |
| 9 | 45 | 13.15 | 13.15 | | |
| 10 | 48 | 13.31 | 13.31 | | |
| 11 | 50 | | 14.02 | | |



Lampiran 9 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

PEMERIKSAAN TITIK BAKAR DAN NYALA BAHAN-BAHAN BITUMEN

Kelompok : _____ Tanggal : 28 April 2017
 Jurusan : Teknik Sipil Asisten : _____
 Universitas : Brawijaya

| No | Kegiatan | Uraian | |
|----|-------------------------------|--|---|
| 1 | Pembukaan Contoh | Contoh dipanaskan Mulai jam = selesai jam = | Pembacaan suhu oven = °C |
| 2 | Menentukan titik nyala contoh | Penuangan contoh Mulai jam = selesai jam = | Pembacaan suhu oven = °C |
| 3 | Kenaikan suhu 2 contoh | Sampai 56°C di bawah titik nyala Mulai jam = selesai jam = | 15°C/menit |
| | | Antara 56°C sampai 28°C di bawah titik nyala Mulai jam = selesai jam = | 5°C - 6°C / menit Titik nyala diperkirakan °C |

| °C di bawah titik nyala | Waktu | °C | Titik Bakar | Titik Nyala |
|-------------------------|-------|-----|-------------|-------------|
| 56 | 1 | 54 | | |
| | 2 | 66 | | |
| | 3 | 110 | | |
| | 4 | 163 | | |
| | 5 | 180 | | |
| | 6 | 191 | | |
| | 7 | 200 | | |
| | 8 | 209 | | |



| | | | | |
|--|----|-----|----------------------|----------------------|
| | 9 | 218 | | |
| | 10 | 224 | | |
| | 11 | 231 | | |
| | 12 | 238 | | |
| | 13 | 243 | | |
| | 14 | 247 | | |
| | 15 | 252 | | |
| | 16 | 257 | | |
| | 17 | 261 | | |
| | 18 | 265 | | |
| | 19 | 266 | | |
| | 20 | 268 | | |
| | 21 | 270 | | |
| | 22 | 272 | | |
| | 23 | 274 | | |
| | 24 | 276 | | |
| | 25 | 279 | | |
| | 26 | 279 | | |
| | 27 | 279 | | |
| | 28 | 279 | | |
| | 29 | 279 | | |
| | 30 | 282 | | |
| | 31 | 283 | | |
| | 32 | 287 | | |
| | 33 | 288 | | |
| | 34 | 289 | | |
| | 35 | 289 | | |
| | 36 | 289 | | |
| | 37 | 289 | | |
| | 38 | 291 | | |
| | 39 | 296 | | |
| | 40 | 300 | | |
| | 41 | 300 | | |
| | 42 | 306 | | |
| | 43 | 313 | | |
| | 44 | 316 | | |
| | 45 | | 319 = titik nyala | |
| | 46 | 324 | | |
| | 47 | 326 | | |
| | 48 | 329 | | |
| | 49 | 331 | | |
| | 50 | 332 | | |
| | 51 | 336 | | |
| | 52 | | | 338 = titik bakar |

Lampiran 10 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal



LABORATORIUM TRANSPORTASI & PENGINDERAAN JAUH
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang Telp. (0341) 577200 Fax. (0341) 577200

PEMERIKSAAN DAKTILITAS BAHAN-BAHAN BITUMEN

Kelompok :
 Jurusan : Teknik Sipil
 Universitas : Brawijaya

Tanggal : 28 April 2017
 Asisten :

| Kegiatan | Uraian | |
|---------------------------|---|--------------------------------------|
| Pembukaan contoh | Contoh dipanaskan Mulai jam Selesai jam | Pembacaan suhu pemanasan = °C |
| Mendinginkan contoh | Didiamkan di suhu ruangan Mulai jam Selesai jam | Pembacaan suhu ruang = °C |
| Mencapai suhu pemeriksaan | Direndam pada suhu 25°C Mulai jam Selesai jam | Pembacaan suhu waterbath = °C |
| Pemeriksaan | Pengujian pada suhu 25°C Mulai jam Selesai jam | Pembacaan suhu alat = °C |

| Daktilitas pada 25°C, 5 cm per menit | Pembacaan pengukuran pada alat |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Pengamatan I | lebih dari 1500 mm |
| Pengamatan II | lebih dari 1500 mm |
| Pengamatan III | lebih dari 1500 mm |
| Rata-rata | lebih dari 1500 mm |



Lampiran 11 Contoh perhitungan *Marshall Test*

| | |
|---|---|
| A= % aspal terhadap agregat | = 4,5% |
| B= % aspal terhadap campuran | = $\frac{4,5}{100+4,5} \times 100\% = 4,31\%$ |
| C= Berat benda uji kering | = 1239 gr |
| D= Berat benda uji dalam air | = 732 gr |
| E= Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD) | = 1246 gr |
| F= Volume benda uji/isi benda uji (E-D) | = 514 gr |
| G= Berat isi benda uji (C/F) | = 2,411 gr/cm ³ |
| H= Berat jenis maksimum teoritis | = $\frac{100}{\frac{\% agregat}{BJ agregat} + \frac{\% aspal}{BJ aspal}}$ |
| | = $\frac{100}{\frac{81,37}{2,89} + \frac{10,217}{1,016}} = 2,58 \text{ gr}$ |
| N= Rongga terhadap campuran (VIM) | = $100 - (100 \times G)/H$ |
| | = $100 - (100 \times 2,411)/2,58 = 6,55\%$ |
| I= Volume total aspal dalam campuran | = $\frac{B \times G}{BJ aspal}$ |
| | = $\frac{4,31 \times 2,411}{1,016} = 10,217\%$ |
| J= Volume agregat dalam campuran | = $\frac{(100 - B) \times G}{BJ agregat}$ |
| | = $\frac{(100 - 4,31) \times 2,411}{2,89} = 81,37\%$ |
| L= Rongga terhadap agregat (VMA) | = $100 - K = 100 - 81,37 = 18,63\%$ |
| M= Rongga terisi aspal (VFA) | = $\frac{100 \times J}{L}$ |
| | = $\frac{100 \times 10,217}{18,63} = 54,83\%$ |

| | |
|---|----------------------------|
| O= Pembacaan dial Stabilitas | = 82 kg |
| P= Angka kalibrasi alat (N dikalibrasi terhadap alat) | = 29,4113 x 82 x 0,4535924 |
| 29,4113 pound/div, 1 pound = 0,4535924 kg | = 1093,94 kg |
| Q= Stabilitas | = 1093,94 x 1 = 1093,94 kg |
| Q= P x Faktor koreksi (dari isi benda uji) | |
| R= Bacaan dial alat <i>flow</i> | = 3,2 mm |
| S= Tinggi benda uji | = 65,7 |
| T= <i>Marshall qoutient</i> (P/Q) | = 1093,94/3,2 = 341,86% |



Lampiran 12 Contoh Tabel Perhitungan *Marshall*

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | | | | 25 | 26 | 27 | |
|---|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | 7 | 8 | 9 | | | | | | | | | | 20 | 21 | 22 | 23 | | | | 24 |
| | <i>N</i> | <i>A</i> | | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> | <i>G</i> | <i>H</i> | <i>I</i> | <i>J</i> | <i>K</i> | <i>L</i> | <i>M</i> | <i>N</i> | <i>O</i> | <i>P</i> | <i>Q</i> | <i>R</i> | <i>S</i> | <i>T</i> | <i>U</i> | <i>V</i> |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Keterangan:

- | | | | | | |
|----|---|-------------------------------|----|---|--------------------------|
| 1 | = | Kode sampel | 20 | = | Dibaca |
| 2 | = | Nomor benda uji | 21 | = | Kalibrasi alat |
| 3 | = | Kadar aspal | 22 | = | Faktor korelasi |
| 4 | = | Berat aspal | 23 | = | Koreksi tebal |
| 5 | = | Aspal terhadap campuran | 24 | = | Stabilitas |
| 6 | = | Berat benda uji | 25 | = | Flow |
| 7 | = | Berat kering | 26 | = | Tinggi benda uji |
| 8 | = | Berat dalam air | 27 | = | <i>Marshall Quotient</i> |
| 9 | = | Berat SSD | | | |
| 10 | = | Isi benda uji | | | |
| 11 | = | Berat jenis campuran | | | |
| 12 | = | Berat jenis campuran teoritis | | | |
| 13 | = | Volume aspal dalam campuran | | | |
| 14 | = | Volume agregat dalam campuran | | | |
| 15 | = | Jumlah kandungan rongga | | | |
| 16 | = | <i>VMA</i> | | | |
| 17 | = | <i>VFA</i> | | | |
| 18 | = | <i>VIM</i> | | | |
| 19 | = | Stabilitas <i>Marshall</i> | | | |

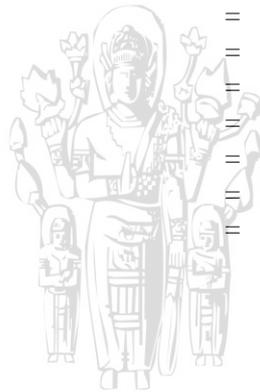


Lampiran 13 Tabel Perhitungan Kadar Aspal Optimum (KAO)

| Sampel | Kadar | Kadar aspal | Berat | | | Volume | Specific Gravity Camp | | volume aspal | volume agregat | VIM | VMA | VFA | Stabilitas | Faktor | Stabilitas | Flow | Tinggi BU | Marshall |
|-----------|-------|-------------|---------|---------|---------|-----------|-----------------------|--------|----------------|----------------|-------|-------|-------|------------|---------|------------|----------|-----------|----------|
| No. | aspal | thdp Camp | Kering | Dlm air | SSD | benda uji | Bulk | Max TS | dalam campuran | dalam campuran | | | | Bacaan | Koreksi | | | | Quotient |
| | (%) | (%) | (gram) | (gram) | (gram) | (gram) | (gram) | (gram) | % | % | % | % | % | Dial | | kg | mm | (mm) | kg/mm |
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
| 1 | 4.5 | 4.31 | 1,004.3 | 623 | 1,045.3 | 422 | 2.38 | 2.55 | 9.88 | 82.29 | 6.60 | 17.71 | 62.77 | 74 | 1.29 | 1,071 | 3.40 | 54.75 | 315.13 |
| 2 | | 4.31 | 1,004.3 | 625 | 1,046.3 | 421 | 2.38 | 2.54 | 9.90 | 82.48 | 6.15 | 17.52 | 64.88 | 69 | 1.31 | 1,020 | 3.10 | 56.45 | 329.03 |
| 3 | | 4.31 | 1,004.3 | 627 | 1,046.3 | 419 | 2.40 | 2.53 | 9.95 | 82.87 | 5.25 | 17.13 | 69.32 | 70 | 1.28 | 1,008 | 3.30 | 54.90 | 305.57 |
| Rata-rata | | | | | 625 | 1,046.0 | | 2.39 | 2.54 | | 82.55 | 6.00 | 17.45 | 65.66 | 71 | 1.29 | 1,033.27 | 3.27 | |
| 1 | 5.0 | 4.76 | 1,004.8 | 626 | 1,048.1 | 422 | 2.38 | 2.49 | 10.93 | 81.97 | 4.36 | 18.03 | 75.82 | 75 | 1.32 | 1,115 | 3.35 | 53.97 | 332.79 |
| 2 | | 4.76 | 1,004.8 | 627 | 1,049.6 | 423 | 2.38 | 2.49 | 10.92 | 81.87 | 4.59 | 18.13 | 74.70 | 77 | 1.27 | 1,102 | 3.10 | 55.65 | 355.36 |
| 3 | | 4.76 | 1,004.8 | 627 | 1,049.6 | 423 | 2.38 | 2.49 | 10.92 | 81.87 | 4.59 | 18.13 | 74.70 | 78 | 1.26 | 1,105 | 3.15 | 55.38 | 350.81 |
| Rata-rata | | | | | 627 | 1,049.1 | | 2.38 | 2.49 | | 81.90 | 4.51 | 18.10 | 75.07 | 77 | 1.28 | 1,107.18 | 3.20 | |
| 1 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 629 | 1,053.9 | 425 | 2.37 | 2.45 | 11.89 | 81.08 | 3.51 | 18.92 | 81.43 | 81 | 1.26 | 1,148 | 2.75 | 55.37 | 417.54 |
| 2 | | 5.21 | 1,005.2 | 629 | 1,053.7 | 425 | 2.37 | 2.45 | 11.90 | 81.12 | 3.42 | 18.88 | 81.88 | 83 | 1.26 | 1,175 | 2.85 | 55.55 | 412.12 |
| 3 | | 5.21 | 1,005.2 | 629 | 1,053.7 | 425 | 2.37 | 2.45 | 11.90 | 81.12 | 3.42 | 18.88 | 81.88 | 84 | 1.25 | 1,183 | 2.65 | 55.55 | 446.48 |
| Rata-rata | | | | | 629 | 1,053.8 | | 2.37 | 2.45 | | 81.10 | 3.45 | 18.90 | 81.73 | 83 | 1.26 | 1168.64 | 2.75 | |
| 1 | 6 | 5.66 | 1,005.7 | 629 | 1,058.5 | 430 | 2.34 | 2.43 | 12.78 | 79.87 | 3.53 | 20.13 | 82.49 | 89 | 1.22 | 1,221 | 2.35 | 56.42 | 519.47 |
| 2 | | 5.66 | 1,005.7 | 630 | 1,059.5 | 430 | 2.34 | 2.43 | 12.78 | 79.87 | 3.53 | 20.13 | 82.49 | 89 | 1.21 | 1,213 | 2.40 | 56.55 | 505.52 |
| 3 | | 5.66 | 1,005.7 | 630 | 1,059.4 | 429 | 2.34 | 2.43 | 12.78 | 79.89 | 3.48 | 20.11 | 82.70 | 90 | 1.21 | 1,229 | 2.30 | 56.55 | 534.52 |
| Rata-rata | | | | | 630 | 1,059.1 | | 2.34 | 2.43 | | 79.87 | 3.51 | 20.13 | 82.56 | 89 | 1.22 | 1221.13 | 2.35 | |
| 1 | 6.5 | 6.10 | 1,006.1 | 633 | 1,064.7 | 432 | 2.33 | 2.39 | 13.72 | 79.12 | 2.50 | 20.88 | 88.03 | 110 | 1.21 | 1,500 | 2.10 | 56.62 | 714.05 |
| 2 | | 6.10 | 1,006.1 | 634 | 1,065.8 | 432 | 2.33 | 2.39 | 13.71 | 79.10 | 2.54 | 20.90 | 87.82 | 104 | 1.21 | 1,421 | 2.20 | 56.75 | 645.75 |
| 3 | | 6.10 | 1,006.1 | 634 | 1,065.8 | 432 | 2.33 | 2.39 | 13.71 | 79.10 | 2.54 | 20.90 | 87.82 | 105 | 1.22 | 1,436 | 2.05 | 56.52 | 700.38 |
| Rata-rata | | | | | 634 | 1,065 | | 2.33 | 2.39 | | 79.11 | 2.53 | 20.89 | 87.89 | 106 | 1.21 | 1451.98 | 2.12 | |

Kolom Keterangan

| | | |
|---|-------------------------------|---|
| B | Kadar aspal thdp campuran | $= A / 100 + A \times 100$ |
| F | Isi benda uji | $= E - D$ |
| G | Bulk specific gravity camp. | $= C / F$ |
| H | Bj. Max. Theoretical Specific | $= \left\{ 100 : \left[\frac{J}{T} + \frac{I}{U} \right] \right\}$ |
| I | Volume aspal dalam camp. | $= (B \times G) / U$ |
| J | Volume agr. Dlm camp. | $= (100 - B) \times G / V$ |
| L | VIM | $= 100 - \left\{ 100 \times \frac{H}{I} \right\}$ |
| M | VMA | $= 100 - G \times (100 - C) / V$ |
| N | VFA | $= 100 \times \left\{ \frac{L - K}{L} \right\}$ |
| P | Stabilitas | $= N \times \text{Kalibrasi alat} \times O$ |
| R | Flow | $= \text{Hasil bacaan alat marshall}$ |
| S | MQ | $= P / Q$ |
| T | - Berat Jenis efektif agregat | $= 2.77$ |
| U | - Berat jenis aspal | $= 1.04$ |
| V | - Berat jenis bulk agregat | $= 2.69$ |
| W | - Kalibrasi alat marshall | $= 11.25$ |
| | - Temperatur Pencampuran | $= 160^{\circ}\text{C}$ |
| | - Temperatur Pemasatan | $= 140^{\circ}\text{C}$ |
| | - Temperatur water Bath | $= 60^{\circ}\text{C}$ |

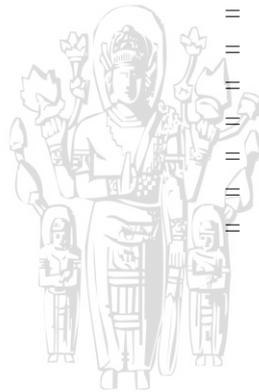


Lampiran 14 Tabel Perhitungan Kadar Filler Optimum

| Sampel No. | Kadar Filler (%) | Kadar aspal (%) | Kadar aspal thdp Camp (%) | Berat | | | Volume benda uji (gram) | Specific Gravity Camp | | volume aspal dalam campuran (%) | volume agregat dalam campuran (%) | VIM (%) | VMA (%) | VFA (%) | Stabilitas Bacaan Dial | Faktor Koreksi | Stabilitas kg | Flow mm | Tinggi i BU (mm) | Marshall Quotient kg/mm |
|------------|------------------|-----------------|---------------------------|---------------|----------------|------------|-------------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|------------------------|----------------|---------------|---------|------------------|-------------------------|
| | | | | Kering (gram) | Dlm air (gram) | SSD (gram) | | Bulk (gram) | Max TS (gram) | | | | | | | | | | | |
| | | | | A | B | C | | D | E | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 635 | 1,063 | 428 | 2.35 | 2.47 | 11.82 | 80.57 | 4.73 | 19.43 | 75.67 | 91 | 1.32 | 1,356 | 3.80 | 53.90 | 356.75 |
| 2 | | | 5.21 | 1,005.2 | 633 | 1,060 | 427 | 2.35 | 2.46 | 11.83 | 80.68 | 4.46 | 19.32 | 76.92 | 90 | 1.28 | 1,296 | 3.70 | 54.90 | 350.40 |
| 3 | | | 5.21 | 1,005.2 | 635 | 1,063 | 428 | 2.35 | 2.47 | 11.81 | 80.49 | 4.90 | 19.51 | 74.86 | 90 | 1.32 | 1,341 | 3.70 | 53.90 | 362.37 |
| 4 | | | 5.21 | 1,005.2 | 636 | 1,064 | 428 | 2.35 | 2.47 | 11.81 | 80.49 | 4.90 | 19.51 | 74.86 | 90 | 1.28 | 1,296 | 3.70 | 54.90 | 350.40 |
| 5 | | | 5.21 | 1,005.2 | 633 | 1,060 | 427 | 2.35 | 2.46 | 11.83 | 80.68 | 4.46 | 19.32 | 76.92 | 91 | 1.32 | 1,356 | 3.50 | 53.90 | 387.33 |
| Rata-rata | | | | | 634 | 1,062 | | 2.35 | 2.47 | | 80.58 | 4.69 | 19.42 | 75.85 | 90.40 | 1.31 | 1,329.01 | 3.68 | | 361.45 |
| 1 | 5 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,059 | 429 | 2.34 | 2.48 | 11.78 | 80.30 | 5.35 | 19.70 | 72.85 | 79 | 1.37 | 1,222 | 3.80 | 52.75 | 321.48 |
| 2 | | | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,059 | 429 | 2.34 | 2.48 | 11.78 | 80.30 | 5.35 | 19.70 | 72.85 | 79 | 1.37 | 1,222 | 3.90 | 52.75 | 313.23 |
| 3 | | | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,059 | 429 | 2.34 | 2.48 | 11.77 | 80.25 | 5.48 | 19.75 | 72.26 | 78 | 1.38 | 1,213 | 3.90 | 52.58 | 310.91 |
| 4 | | | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,059 | 429 | 2.34 | 2.48 | 11.77 | 80.27 | 5.44 | 19.73 | 72.45 | 77 | 1.38 | 1,197 | 3.95 | 52.58 | 303.04 |
| 5 | | | 5.21 | 1,005.2 | 632 | 1,062 | 430 | 2.34 | 2.48 | 11.75 | 80.12 | 5.79 | 19.88 | 70.89 | 78 | 1.37 | 1,198 | 3.95 | 52.97 | 303.25 |
| Rata-rata | | | | | 630 | 1,060 | | 2.34 | 2.48 | | 80.25 | 5.48 | 19.75 | 72.26 | 78.20 | 1.38 | 1,210.11 | 3.90 | | 310.38 |
| 1 | 6 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,056 | 426 | 2.36 | 2.46 | 11.86 | 80.87 | 4.01 | 19.13 | 79.04 | 81 | 1.36 | 1,243 | 3.90 | 53.00 | 318.61 |
| 2 | | | 5.21 | 1,005.2 | 627 | 1,054 | 427 | 2.35 | 2.46 | 11.83 | 80.68 | 4.46 | 19.32 | 76.92 | 80 | 1.37 | 1,234 | 3.80 | 52.83 | 324.68 |
| 3 | | | 5.21 | 1,005.2 | 627 | 1,054 | 427 | 2.35 | 2.47 | 11.83 | 80.62 | 4.59 | 19.38 | 76.29 | 82 | 1.37 | 1,265 | 3.80 | 52.83 | 332.80 |
| 4 | | | 5.21 | 1,005.2 | 627 | 1,054 | 427 | 2.36 | 2.46 | 11.84 | 80.74 | 4.32 | 19.26 | 77.55 | 81 | 1.37 | 1,249 | 3.80 | 52.83 | 328.74 |
| 5 | | | 5.21 | 1,005.2 | 633 | 1,060 | 427 | 2.35 | 2.46 | 11.83 | 80.68 | 4.46 | 19.32 | 76.92 | 82 | 1.34 | 1,234 | 3.90 | 53.60 | 316.33 |
| Rata-rata | | | | | 629 | 1,056 | | 2.36 | 2.46 | | 80.72 | 4.37 | 19.28 | 77.34 | 81.20 | 1.36 | 1,244.78 | 3.84 | | 324.23 |
| 1 | 7 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 627 | 1,054 | 427 | 2.35 | 2.46 | 11.83 | 80.68 | 4.46 | 19.32 | 76.92 | 93 | 1.33 | 1,388 | 3.70 | 53.85 | 375.07 |
| 2 | | | 5.21 | 1,005.2 | 626 | 1,053 | 427 | 2.35 | 2.46 | 11.83 | 80.68 | 4.46 | 19.32 | 76.92 | 91 | 1.31 | 1,341 | 3.70 | 54.23 | 362.36 |
| 3 | | | 5.21 | 1,005.2 | 628 | 1,054 | 426 | 2.36 | 2.46 | 11.86 | 80.87 | 4.01 | 19.13 | 79.04 | 92 | 1.31 | 1,351 | 3.70 | 54.33 | 365.12 |
| 4 | | | 5.21 | 1,005.2 | 626 | 1,054 | 428 | 2.35 | 2.47 | 11.81 | 80.49 | 4.90 | 19.51 | 74.86 | 92 | 1.31 | 1,351 | 3.70 | 54.33 | 365.12 |
| 5 | | | 5.21 | 1,005.2 | 626 | 1,053 | 427 | 2.36 | 2.46 | 11.85 | 80.78 | 4.23 | 19.22 | 77.97 | 93 | 1.31 | 1,370 | 3.50 | 54.23 | 391.49 |
| Rata-rata | | | | | 627 | 1,054 | | 2.35 | 2.46 | | 80.70 | 4.41 | 19.30 | 77.14 | 92.20 | 1.31 | 1,360.11 | 3.66 | | 371.83 |
| 1 | 8 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 627 | 1,052 | 425 | 2.37 | 2.45 | 11.89 | 81.06 | 3.56 | 18.94 | 81.22 | 87 | 1.36 | 1,333 | 3.70 | 53.03 | 360.32 |
| 2 | | | 5.21 | 1,005.2 | 629 | 1,054 | 425 | 2.36 | 2.45 | 11.88 | 81.00 | 3.69 | 19.00 | 80.56 | 84 | 1.36 | 1,284 | 3.60 | 53.10 | 356.79 |
| 3 | | | 5.21 | 1,005.2 | 631 | 1,056 | 425 | 2.37 | 2.45 | 11.89 | 81.06 | 3.56 | 18.94 | 81.22 | 84 | 1.36 | 1,284 | 3.50 | 53.10 | 366.99 |
| 4 | | | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,054 | 424 | 2.37 | 2.45 | 11.91 | 81.19 | 3.24 | 18.81 | 82.78 | 84 | 1.36 | 1,284 | 3.60 | 53.10 | 356.79 |
| 5 | | | 5.21 | 1,005.2 | 630 | 1,056 | 426 | 2.36 | 2.46 | 11.87 | 80.89 | 3.96 | 19.11 | 79.25 | 88 | 1.34 | 1,328 | 3.60 | 53.50 | 368.97 |
| Rata-rata | | | | | 629 | 1,055 | | 2.36 | 2.45 | | 81.04 | 3.60 | 18.96 | 81.00 | 85.40 | 1.36 | 1,302.97 | 3.60 | | 361.97 |
| 1 | 9 | 5.5 | 5.21 | 1,005.2 | 632 | 1,054 | 422 | 2.38 | 2.44 | 11.97 | 81.60 | 2.27 | 18.40 | 87.64 | 80 | 1.35 | 1,213 | 3.70 | 53.35 | 327.96 |
| 2 | | | 5.21 | 1,005.2 | 631 | 1,053 | 422 | 2.38 | 2.44 | 11.97 | 81.62 | 2.23 | 18.38 | 87.88 | 79 | 1.38 | 1,223 | 3.60 | 52.72 | 339.69 |
| 3 | | | 5.21 | 1,005.2 | 632 | 1,054 | 422 | 2.38 | 2.44 | 11.98 | 81.64 | 2.18 | 18.36 | 88.12 | 79 | 1.37 | 1,221 | 3.50 | 52.77 | 348.85 |
| 4 | | | 5.21 | 1,005.2 | 633 | 1,055 | 422 | 2.38 | 2.44 | 11.97 | 81.58 | 2.32 | 18.42 | 87.40 | 78 | 1.38 | 1,207 | 3.50 | 52.72 | 344.98 |
| 5 | | | 5.21 | 1,005.2 | 632 | 1,054 | 422 | 2.38 | 2.44 | 11.96 | 81.56 | 2.37 | 18.44 | 87.17 | 79 | 1.37 | 1,221 | 3.60 | 52.77 | 339.15 |
| Rata-rata | | | | | 632 | 1,054 | | 2.38 | 2.44 | | 81.60 | 2.27 | 18.40 | 87.64 | 79.00 | 1.37 | 1,217.14 | 3.58 | | 340.13 |

Kolom Keterangan

| | | |
|---|-------------------------------|---|
| B | Kadar aspal thdp campuran | $= A / 100 + A \times 100$ |
| F | Isi benda uji | $= E - D$ |
| G | Bulk spesific gravity camp. | $= C / F$ |
| H | Bj. Max. Theoretical Specific | $= \left\{ 100 : \left[\frac{J}{T} + \frac{I}{U} \right] \right\}$ |
| I | Volume aspal dalam camp. | $= (B \times G) / U$ |
| J | Volume agr. Dlm camp. | $= (100 - B) \times G / V$ |
| L | VIM | $= 100 - \left\{ 100 \times \frac{H}{I} \right\}$ |
| M | VMA | $= 100 - G \times (100 - C) / V$ |
| N | VFA | $= 100 \times \left\{ \frac{L - K}{L} \right\}$ |
| P | Stabilitas | $= N \times \text{Kalibrasi alat} \times O$ |
| R | Flow | $= \text{Hasil bacaan alat marshall}$ |
| S | MQ | $= P / Q$ |
| T | - Berat Jenis efektif agregat | $= 2.77$ |
| U | - Berat jenis aspal | $= 1.04$ |
| V | - Berat jenis bulk agregat | $= 2.69$ |
| W | - Kalibrasi alat marshall | $= 11.25$ |
| | - Temperatur Pencampuran | $= 160^{\circ}\text{C}$ |
| | - Temperatur Pematatan | $= 140^{\circ}\text{C}$ |
| | - Temperatur water Bath | $= 60^{\circ}\text{C}$ |





Gambar proses penimbangan untuk pengujian berat jenis agregat



Gambar proses pengujian keausan agregat



Gambar proses pengujian penetrasi dan berat jenis aspal



Gambar proses pengujian titik lembek, daktilitas dan titik nyala-bakar aspal



Proses pemilihan bahan agregat menjadi fraksi-fraksi



Proses pengorengan dan penambahan aspal



Suhu pencampuran agregat dan aspal



Suhu pencampuran benda uji



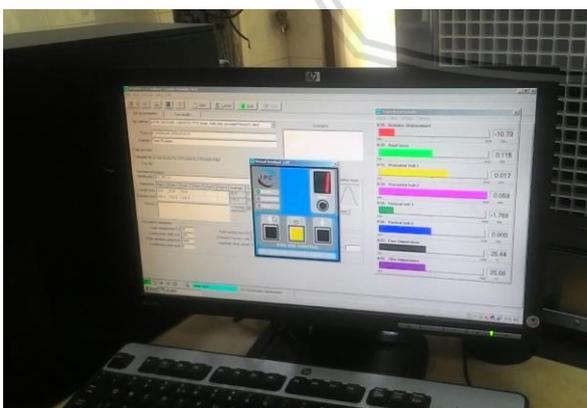
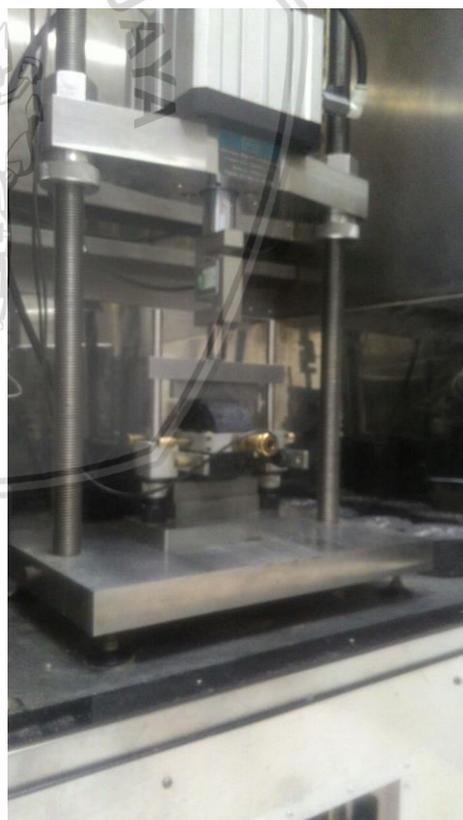
Proses pemasukan dan pemadatan pada cincin *mold*



Proses perendaman dan perendam pada *waterbath*



Proses pemasangan dan pengujian benda uji dengan alat *Marshall Compression Machine*



Proses pemasangan dan pengujian benda uji dengan alat *UMATTA*