

TUGAS AKHIR

**PENGARUH LIMBAH SERBUK BESI SEBAGAI
MATERIAL PENGGANTI *FILLER* TERHADAP
KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX*
ASPHALT
(*EFFECT OF IRON POWDERING WASTE AS FILLER
SUBSTITUTE MATERIAL ON THE
CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT
MIXTURE*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**ROBY OCTAVIAN
20511116**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2024**

TUGAS AKHIR

**PENGARUH LIMBAH SERBUK BESI SEBAGAI
MATERIAL PENGANTI *FILLER* TERHADAP
KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX*
ASPHALT
(*EFFECT OF IRON POWDERING WASTE AS FILLER
SUBSTITUTE MATERIAL ON THE
CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT
MIXTURE*)**

Disusun oleh

ROBY OCTAVIAN
20511116

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 13 Maret 2024

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing I



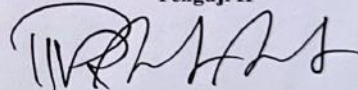
Atahul Fauziah, S.T., M.t., Ph.D.
NIK: 955110103

Penguji I



Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.
NIK: 145110101

Penguji II



Pravogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc.
NIK: 205111303

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng.)
NIK: 095110101

26/3/24

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 13 Maret 2024
Yang membuat pernyataan,



Roby Octavian
(20511116)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik dan hidaya-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Pengaruh Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengganti Filler Terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt*. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

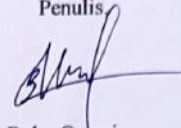
1. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penyusunan tugas akhir.
2. Ibu Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji tugas akhir, yang telah memberikan arahan serta bimbingan untuk menyempurnakan tugas akhir.
3. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng.) selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, yang telah memberikan semangat dan dukungan selama proses perkuliahan.
4. Para staff Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII, yang telah membantu menyelesaikan penelitian.
5. Kedua orang tua, Bapak Sutaryo dan Ibu Sumi Larasati serta keluarga, Denis Faisal, dan Maya Indah Puspitasari, yang selalu memberikan motivasi, semangat, do'a, serta dukungan yang tulus dan tiada henti kepada penulis sehingga penulis bisa sampai pada titik ini, dan
6. Teman-teman yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan bantuan selama penyusunan laporan Tugas Akhir, Hanif Novia Yuda, Muhammad Ishomudin

Wahid, Aldi Fadlan, Khairul Nur Ihfansyah, Putri Yasmin Azzahra, Alief Akbar Apriansyah, dan Rizky Ayu Adha Pramudhita.

Saya memohon maaf apabila terdapat kesalahan penulisan dan sebagaimana. Saya berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun orang lain.

Yogyakarta, 13 Maret 2024

Penulis



Roby Octavian
(20511116)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI	xvii
DAFTAR SINGKATAN	xviii
ABSTRAK	xix
<i>ABSTRACT</i>	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Fungsi <i>Filler</i> Pada Campuran Aspal Agregat Panas	5
2.2 Pemanfaatan Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengganti <i>Filler</i>	5
2.3 Pemanfaatan <i>Filler</i> Sebagai Substitusi Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>	6
2.4 Penelitian Terkait Substitusi <i>Filler</i> Terhadap Campuran Aspal	7
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Perkerasan Lentur Jalan	15
3.2 Limbah Serbuk Besi	15
3.3 Karakteristik Beton Aspal	16
3.3.1 Kelenturan (<i>Flexibility</i>)	16

3.3.2	Stabilitas (<i>Stability</i>)	16
3.3.3	Keawetan (<i>Durability</i>)	17
3.3.4	Kekesatan (<i>Skid Resistance</i>)	17
3.3.5	Ketahanan Terhadap Kelelahan (<i>Fatigue Resistance</i>)	17
3.3.6	Kedap Air (<i>Impermeabilitas</i>)	17
3.3.7	Kemudahan Pelaksanaan (<i>Workability</i>)	18
3.4	Material Penyusun Perkerasan Lentur Jalan	18
3.4.1	Agregat	18
3.4.2	Gradasi Agregat	19
3.4.3	Aspal	20
3.4.4	Bahan Aditif	21
3.4.5	Bahan Pengisi (<i>Filler</i>)	22
3.5	Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	22
3.6	Karakteristik Pengujian <i>Marshall</i>	23
3.6.1	Stabilitas (<i>Stability</i>)	23
3.6.2	Kelelahan (<i>Flow</i>)	24
3.6.3	<i>Marshall Quotient</i>	24
3.6.4	<i>VITM (Void in the Total Mix)</i>	25
3.6.5	<i>VFWA (Void Filled With Asphalt)</i>	26
3.6.6	<i>VMA (Void in Mineral Aggregate)</i>	27
3.6.7	Kepadatan (<i>Density</i>)	28
3.7	Pengujian Perendaman <i>Index of Retained Strength (IRS)</i>	29
3.8	Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i>	29
3.9	Pengujian <i>Tensile Strength Ratio (TSR)</i>	30
3.10	Pengujian <i>Draindown</i>	30
3.11	Pengujian <i>Cantabro Loss</i>	31
3.12	Indeks Durabilitas Pertama (IDP)	31
3.13	Indeks Durabilitas Kedua (IDK)	32
3.14	<i>Void in Coarse Aggregate (VCA)</i>	33
3.15	Analisis Statistik ANOVA	33
BAB IV METODE PENELITIAN		35

4.1	Metode Penelitian	35
4.2	Metode Pengambilan Sampel	35
4.3	Metode Pengambilan Data	35
4.4	Tahapan Penelitian	36
4.4.1	Persiapan dan Pemeriksaan Material	36
4.4.2	Persiapan Alat	38
4.4.3	Perencanaan Campuran	39
4.4.4	Pembuatan Campuran Benda Uji	44
4.4.5	Pengujian <i>Marshall</i>	45
4.4.6	Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i>	46
4.4.7	Pengujian <i>Tensile Strength Rasio (TSR)</i>	46
4.4.8	Pengujian <i>Indeks of Retained Strength (IRS)</i>	46
4.4.9	Pengujian <i>Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition</i> <i>(VCA_{DRC})</i>	47
4.4.10	Pengujian <i>Draindown</i>	48
4.4.11	Pengujian <i>Cantabro loss</i>	49
4.5	Analisis Data	49
4.5.1	Analisis Karakteristik <i>Marshall</i>	49
4.5.2	Analisis Pengujian <i>IRS</i>	50
4.5.3	Analisis Pengujian <i>ITS</i>	50
4.5.4	Analisis Pengujian <i>TSR</i>	50
4.5.5	Analisis Pengujian <i>Draindown</i>	50
4.5.6	Analisis Pengujian <i>Contabro Loss</i>	51
4.5.7	Analisis Nilai IDP	51
4.5.8	Analisis nilai IDK	51
4.5.9	Analisis Pengujian <i>VCA</i>	51
4.5.10	Analisis Statistik <i>ANOVA</i> Satu Arah	51
4.6	Bagan Alir Penelitian	51
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		54
5.1	Hasil Pengujian Bahan Dan Campuran	54
5.1.1	Hasil Pengujian Karakteristik Aspal	54

5.1.2	Hasil Pengujian Karakteristik Agregat	54
5.1.3	Hasil Pengujian Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> 25 mm pada Kadar Aspal Optimum	57
5.2	Pembahasan	62
5.2.1	Hasil Pengujian Karakteristik Aspal	62
5.2.2	Hasil Pengujian Karakteristik Agregat kasar	63
5.2.3	Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus	64
5.2.4	Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (<i>Filler</i>)	65
5.2.5	Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum	66
5.2.6	Karakteristik <i>Marshall</i> pada Kadar Aspal Optimum Campuran dengan Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	70
5.2.7	Analisis Pengaruh Variasi Substitusi <i>filler</i> Terhadap Nilai VCA	80
5.2.8	Analisis Pengaruh Variasi Substitusi <i>filler</i> Terhadap Nilai <i>Draindown</i>	81
5.2.9	Analisis Pengaruh Variasi Substitusi <i>filler</i> Terhadap Nilai <i>Cantabro Loss</i>	82
5.2.10	Analisis Pengaruh Variasi Substitusi <i>filler</i> Terhadap Nilai ITS	84
5.2.11	Analisis Pengaruh Variasi Substitusi <i>filler</i> Terhadap Nilai <i>TSR</i>	85
5.2.12	Analisis Pengaruh Variasi Substitusi <i>filler</i> Terhadap Nilai <i>IRS</i>	86
5.3	Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan <i>Filler</i> Serbuk Besi	90
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		96
6.1	Kesimpulan	96
6.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA		97
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi <i>Filler</i> Terhadap Campuran Aspal	8
Tabel 3.1 Kandungan Kimia Limbah Serbuk Besi	16
Tabel 3.2 Persyaratan Agregat Kasar	19
Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Halus	19
Tabel 3.4 Gradasi Agregat Gdebugan Campuran SMA	20
Tabel 3.5 Persyaratan Aspal Keras AC 60/70	21
Tabel 3.6 Persyaratan Serat Selulosa	21
Tabel 3.7 Persyaratan <i>Stone Matrix Asphalt</i>	22
Tabel 4.1 Gradasi Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> 25 mm	40
Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5%	42
Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5,5%	42
Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6%	42
Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5%	43
Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 7%	43
Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO	43
Tabel 4.8 Jumlah Benda Uji Untuk Setiap Pengujian KAO	44
Tabel 5.1 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70	54
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar	55
Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng	55
Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis <i>Filler</i>	55
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Untuk Menentukan KAO	56
Tabel 5. 6 Berat Debu Batu dan Serbuk Besi	57
Tabel 5. 7 Hasil Rekapitulasi Pengujian Marshall pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	58
Tabel 5. 8 Hasil Rekapitulasi Pengujian VCA pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	58
Tabel 5. 9 Hasil Rekapitulasi Pengujian <i>Draindown</i> pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	59

Tabel 5. 10 Hasil Rekapitulasi Pengujian <i>IRS</i> pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	59
Tabel 5. 11 Hasil Rekapitulasi Pengujian IDP pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	59
Tabel 5. 12 Hasil Rekapitulasi Pengujian IDK pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	60
Tabel 5. 13 Hasil Rekapitulasi Pengujian <i>ITS</i> pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	60
Tabel 5. 14 Hasil Rekapitulasi Pengujian <i>TSR</i> pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	60
Tabel 5. 15 Hasil Rekapitulasi Pengujian Cantabro Loss pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	61
Tabel 5. 16 Rekapitulasi Data Uji Statistika ANOVA Satu Arah Untuk Pengaruh <i>Filler</i> Serbuk Besi Terhadap Karakteristik <i>Marshall</i>	61
Tabel 5. 17 Rekapitulasi Data Uji Statistika ANOVA Satu Arah Untuk Pengaruh <i>Filler</i> Serbuk Besi Terhadap <i>IRS</i> , IDP, IDK, <i>ITS</i> , <i>TSR</i> , <i>VCA</i> , <i>Cantabro</i> , dan <i>Draindown</i>	62
Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan <i>Filler</i> Limbah Serbuk Besi	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai Stabilitas	24
Gambar 3.2 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai Flow	24
Gambar 3.3 Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai <i>Marshall Quotient</i>	25
Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai VITM	26
Gambar 4.1 Grafik Gradasi Rencana Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> 25 mm	41
Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian	52
Gambar 5. 1 Penentuan Kadar Aspal Optimum dengan Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	56
Gambar 5. 2 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas	66
Gambar 5. 3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai <i>Flow</i>	67
Gambar 5. 4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VITM	67
Gambar 5. 5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VMA	68
Gambar 5. 6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VCA	69
Gambar 5. 7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai <i>Draindown</i>	69
Gambar 5. 8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai <i>IRS</i>	70
Gambar 5. 9 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap VITM	71
Gambar 5.10 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap VFWA	72
Gambar 5.11 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap VMA	74
Gambar 5.12 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap Density	75
Gambar 5.13 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap Stabilitas	76
Gambar 5.14 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>Flow</i>	77

Gambar 5.15 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>MQ</i>	79
Gambar 5.16 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>VCA</i>	80
Gambar 5.17 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>Draindown</i>	81
Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>Cantabro Loss</i>	83
Gambar 5.19 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>ITS</i>	84
Gambar 5.20 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>TSR</i>	85
Gambar 5.21 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas	87
Gambar 5.22 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>IRS</i>	87
Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>IDP</i>	88
Gambar 5.24 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>IDK</i>	89
Gambar 5.25 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi <i>Filler</i> Terhadap <i>Sa</i>	90

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70	101
Lampiran 2. Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70	102
Lampiran 3. Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70	103
Lampiran 4. Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70	104
Lampiran 5. Pemeriksaan Kelarutan Aspal Dalam <i>TCE</i>	105
Lampiran 6. Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70	106
Lampiran 7. Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar	107
Lampiran 8. Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	108
Lampiran 9. Pemeriksaan Keausan Agregat Dengan Mesin <i>Los Angeles</i>	109
Lampiran 10. Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus	110
Lampiran 11. Pemeriksaan <i>Sand Equivalent</i>	111
Lampiran 12. Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler</i> Debu Batu	112
Lampiran 13. Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler</i> Serbuk Besi	113
Lampiran 14. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Marshall</i>	114
Lampiran 15. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>IRS</i>	115
Lampiran 16. Sifat Campuran <i>Void Course Aggregate (VCA)</i>	116
Lampiran 17. Sifat Campuran <i>Draindown</i>	117
Lampiran 18. Rekapitulasi Perhitungan KAO	118
Lampiran 19. Sifat Campuran Metode <i>Marshall</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	120
Lampiran 20. Rekapitulasi Perhitungan KAO pada Substitusi <i>Filler</i> Debu Serbuk Besi	121
Lampiran 21. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>ITS</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	122
Lampiran 22. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>TSR</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	123
Lampiran 23. Rekapitulasi Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>ITS</i> dan <i>TSR</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	124

Lampiran 24. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Cantabro Loss</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	125
Lampiran 25. Rekapitulasi Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Cantabro Loss</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	126
Lampiran 26. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Draindown</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	127
Lampiran 27. Rekapitulasi Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Draindown</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	128
Lampiran 28. Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Void Course Aggregate (VCA)</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	129
Lampiran 29. Rekapitulasi Sifat Campuran Aspal Dengan Metode <i>Void Course Aggregate (VCA)</i> pada Substitusi <i>Filler</i> Serbuk Besi	130
Lampiran 30. Hasil Analisis ANOVA Terhadap Karakteristik <i>Marshall</i>	131
Lampiran 31. Hasil Analisis ANOVA Terhadap <i>IRS</i> , <i>IDP</i> , <i>IDK</i> , <i>ITS</i> , <i>TSR</i> , <i>VCA</i> , <i>Cantabro Loss</i> , dan <i>Draindown</i>	132

DAFTAR NOTASI

A_0	=	Konstanta
A	=	Nilai absolut kehilangan selama satu hari (kg)
A	=	Persentase agregat dan aspal yang tertinggal (%)
B	=	Berat akhir piring penampung (gr)
C	=	Berat awal jumlah campuran yang diuji (gr)
a	=	Persentase aspal terhadap batu
a	=	Kehilangan kekuatan rerata satu hari (%)
b	=	Persentase aspal terhadap campuran
c	=	Berat benda uji sebelum direndam (gr)
d	=	Berat benda uji dalam keadaan jenuh (SSD) (gr)
e	=	Berat dalam air (gr)
f	=	Volume (cm ³)
g	=	Berat isi sampel (gr/cc)
G_{CA}	=	Berat jenis <i>bulk</i> dari fraksi campuran agregat kasar
G_{mb}	=	Berat jenis <i>bulk</i> dari campuran aspal yang telah dipadatkan
h	=	Berat jenis maksimum teoritis campuran
L	=	Persentase kehilangan berat (%)
l	=	Nilai VMA (%)
m	=	Nilai rongga terisi aspal (VFWA) (%)
MQ	=	Nilai <i>Marshall Quotient</i> (kg/mm)
Mo	=	Berat sebelum diabrasi (gr)
Mi	=	Berat setelah diabrasi (gr)
n	=	Nilai rongga dalam campuran (VITM) (%)
P_{CA}	=	Persentase campuran agregat kasar dalam total campuran aspal
P_{runtuh}	=	Beban puncak (kg)
q	=	Nilai stabilitas (kg)
r	=	Nilai <i>flow</i> (mm)
r	=	Indeks penurunan stabilitas (%)

S_1	=	Stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam
S_2	=	Stabilitas setelah direndam selama 24 jam
SA	=	Nilai absolut kekuatan sisa satu hari
Sa	=	Persentase kekuatan sisa satu hari (%)
So	=	Nilai absolut kekuatan awal (kg)
Si	=	Persentase kekuatan sisa pada waktu t_i (%)
$Si+1$	=	Persentase kekuatan sisa pada waktu t_i+1 (%)
S_1	=	Rata-rata nilai ITS tanpa rendaman
S_2	=	Rata-rata nilai ITS setelah perendaman 24 jam (kg)
t_{1+1}	=	Periode perendaman
V_s	=	Volume silinder takaran (m^3)
W_s	=	Berat silinder takaran (kg)
W_{s+w}	=	Berat silinder takaran dengan air (kg)
Y_w	=	Kepadatan atau berat satuan air pada suhu tertentu (kg/m^3)
Y_w	=	Berat satuan agregat kasar dalam kondisi <i>dry-rodded</i> (kg/m^3)

DAFTAR SINGKATAN

<i>AASHTO</i>	=	<i>America Association of State Highway and Transport</i>
<i>ANOVA</i>	=	<i>Analysis of Variance</i>
<i>IDP</i>	=	<i>Indeks Durabilitas Pertama</i>
<i>IDK</i>	=	<i>Indeks Durabilitas Kedua</i>
<i>ITS</i>	=	<i>Indirect Tensile Strength</i>
<i>IRS</i>	=	<i>Index of Retained Strength</i>
<i>KAO</i>	=	<i>Kadar Aspal Optimum</i>
<i>MQ</i>	=	<i>Marshall Quotient</i>
<i>SMA</i>	=	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
<i>SNI</i>	=	<i>Standar Nasional Indonesia</i>
<i>TSR</i>	=	<i>Tensile Strength Ratio</i>
<i>VITM</i>	=	<i>Void in the Total Mix</i>
<i>VFWA</i>	=	<i>Void Filled With Asphalt</i>
<i>VMA</i>	=	<i>Void in Mineral Agregate</i>
<i>VCA</i>	=	<i>Void in Coarse Aggregate</i>
<i>VCA_{DRC}</i>	=	<i>Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition</i>
<i>VCA_{MIX}</i>	=	<i>Void Coarse Aggregate Mix</i>

ABSTRAK

Jalur pantura merupakan jalur vital karena merupakan jalur utama transportasi dan menjadi akses bagi aktivitas ekonomi, pariwisata, dan industri. Volume lalu lintas yang cukup besar di jalur tersebut juga menimbulkan beban yang tinggi bagi perkerasan jalan, sehingga dibutuhkan perkerasan jalan yang kuat dan tahan lama. Sehingga limbah serbuk besi dapat dimanfaatkan sebagai *filler* pengganti. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh limbah serbuk besi sebagai substitusi filler terhadap kekuatan struktur, parameter volumetrik, dan durabilitas pada campuran *Stone Matrix Asphalt*.

Penelitian dimulai dengan pengujian fisik bahan agregat dan aspal, selanjutnya menentukan nilai KAO dengan parameter stabilitas, *flow*, *VITM*, *VMA*, *Draindown*, dan *IRS*. Selanjutnya dilakukan pengujian *Marshall*, *ITS*, *TSR*, *IRS*, *IDP*, *IDK*, *VCA*, *Draindown*, dan *Cantabro loss* dengan substitusi *filler* serbuk besi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Standar yang digunakan dalam penelitian mengacu Spesifikasi Bina Marga (2018) Revisi 2 dan *AASHTO*.

Hasil penelitian menunjukkan variasi kadar substitusi *filler* serbuk besi terbaik pada kadar 50%. Pada parameter kekuatan struktur berdasarkan nilai stabilitas, *flow*, *MQ*, dan *ITS*, menghasilkan campuran dimana pada kadar substitusi optimum 50% menghasilkan campuran yang kaku dan tahan deformasi, akan tetapi tidak tahan terhadap kuat tariknya. Pada parameter volumetrik berdasarkan *VITM*, *VFWA*, *VMA*, *VCA*, dan *density*, menghasilkan campuran menjadi lebih berongga. Pada substitusi titik optimum sebesar 50% campuran memiliki selimut aspal dan kontak antar agregat yang baik. Pada parameter durabilitas berdasarkan *IRS*, *IDP*, *IDK*, *draindown*, *cantabro*, dan *TSR*, menghasilkan campuran yang mampu menerima repetisi beban lalu lintas serta mampu menahan keausan akibat pengaruh cuaca iklim, seperti udara, air, atau perubahan temperatur.

Kata kunci: Limbah Serbuk Besi, Bahan Pengisi (*Filler*), *Stone Matrix Asphalt*

ABSTRACT

The Pantura route is a vital route because it is the main route of transportation and is an access for economic activity, tourism and industry. The large volume of traffic on the route also creates a high load for the pavement, so a strong and durable pavement is needed. So that iron powder waste can be used as a substitute filler. The purpose of this study was to determine the effect of iron powder waste as a filler substitution on structural strength, volumetric parameters, and durability in Stone Matrix Asphalt mixtures.

The research started with physical testing of aggregate materials and asphalt, then determining the KAO value with the parameters of stability, flow, VITM, VMA, Draindown, and IRS. Furthermore, Marshall, ITS, TSR, IRS, IDP, IDK, VCA, Draindown, and Cantabro loss tests were conducted with 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% iron powder filler substitution. The standards used in the research refer to Bina Marga Specifications (2018) Revision 2 and AASHTO.

The results showed the best variation of iron powder filler substitution levels at 50%. In the structural strength parameter based on the values of stability, flow, MQ, and ITS, the result is a mixture where the optimum substitution level of 50% produces a mixture that is stiff and resistant to deformation, but not resistant to tensile strength. In volumetric parameters based on VITM, VFWA, VMA, VCA, and density, the mixture becomes more hollow. At the optimum substitution point of 50%, the mix has a good asphalt blanket and contact between aggregates. Durability parameters based on IRS, IDP, IDK, draindown, cantabro, and TSR, resulted in a mixture that was able to accept repetition of traffic loads and was able to resist wear due to climatic weather influences, such as air, water, or temperature changes.

Keyword : Iron Powder Waste, Filler, Stone Matrix Asphalt

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalur pantai utara Jawa atau yang biasa disebut dengan pantura merupakan jalur yang sangat strategis dan vital karena merupakan jalur utama transportasi antara kota-kota besar di pulau Jawa dan menjadi akses utama bagi aktivitas ekonomi, pariwisata, dan industri. Selain itu, volume lalu lintas yang cukup besar di jalur tersebut juga menimbulkan beban yang cukup tinggi bagi perkerasan jalan, sehingga dibutuhkan perkerasan jalan yang kuat dan tahan lama. Dengan dibuatnya perkerasan jalan yang kuat dan tahan lama di jalur pantura, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi waktu dan biaya dalam transportasi barang dan orang di wilayah tersebut.

Salah satu daerah yang dilewati jalur pantura adalah kota Pati yang dimana terletak di Provinsi Jawa Tengah. Kota Pati menjadi tempat berdirinya banyak industri, termasuk industri kerajinan logam. Industri kerajinan logam ini banyak menghasilkan limbah logam yang salah satunya berupa limbah serbuk besi pada penelitian ini mengambil sampel di salah satu industri milik Bapak Sutaryo. Menurut Daryus (2008), biji besi yang didapatkan dari alam umumnya merupakan senyawa besi dengan oksigen seperti *hematite* (Fe_2O_3), *magnetite* (Fe_3O_4), *limonite* (Fe_2O_3) atau *siderite* (Fe_2CO_3). Pembentukan senyawa besi oksida tersebut sebagai proses alam yang terjadi selama beribu-ribu tahun. Kandungan senyawa besi di bumi ini mencapai 5% dari seluruh kerak bumi ini. Serbuk besi adalah bagian dari hasil sisa potongan atau sisa pembubutan besi tuang yang merupakan hasil di pemakaian industri.

Limbah serbuk besi merupakan limbah yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia jika tidak dikelola dengan baik. Limbah serbuk besi sangat jarang digunakan sebagai material yang bernilai efektif sehingga hanya akan menyebabkan timbulnya polusi pada lingkungan, selain itu limbah serbuk besi juga mudah untuk didapat dan lebih ekonomis. Berdasarkan hal tersebut maka dilakukan

sebuah inovasi dengan cara memanfaatkan limbah serbuk besi tersebut sebagai salah satu bahan penyusun perkerasan jalan yang berupa bahan pengisi (*filler*). Pada penelitian terdahulu yang menggunakan limbah serbuk besi sebagai material pengisi (*filler*) adalah Utomo N dkk (2020) yang dimana pada penelitian tersebut nilai *VMA*, *VFA*, *VIM*, stabilitas, *flow*, dan *marshall quotient* memenuhi syarat Spesifikasi Bina Marga.

Perkerasan jalan adalah lapisan yang terletak diatas pondasi jalan yang berfungsi sebagai struktur pendukung jalan dan menahan beban kendaraan. Jenis perkerasan jalan umum digunakan adalah perkerasan jalan aspal (*asphalt concrete*). Campuran aspal adalah suatu campuran pada perkerasan jalan aspal yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, *filler* dan aspal sebagai bahan pengikat. Campuran aspal yang memiliki keunggulan berupa daya tahan yang tinggi terhadap beban kendaraan yang berat dan mengurangi kerusakan pada perkerasan jalan adalah campuran *Stone Matrix Asphalt*.

Stone Matrix Asphalt (SMA) adalah jenis campuran beraspal yang digunakan sebagai lapis permukaan. Campuran *SMA* memiliki beberapa karakteristik diantaranya seperti lebih tahan terhadap deformasi, mempunyai *skid resitence* yang tinggi karena kadar agregat kasar nya besar dan mempunyai kecenderungan lebih tahan lama, dan juga karena kadar aspalnya tinggi dan distabilisasi dengan serat selulosa. Dengan hal tersebut sehingga *SMA* dapat melayani kendaraan berat dengan lebih baik, serta tahan terhadap temperatur tinggi yang di mana itu cocok digunakan pada daerah iklim tropis. Salah satu material penyusun campuran *SMA* yaitu *filler*. Kadar *filler* pada campuran *SMA* relatif sedikit namun dapat memberi dampak yang besar dikarenakan dapat meningkatkan stabilisasi dari campuran itu sendiri.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian di atas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* terhadap kekuatan struktur campuran *Stone Matrix Asphalt* ?

2. Bagaimana pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* terhadap parameter volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt* ?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* terhadap kekuatan struktur campuran *Stone Matrix Asphalt*.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* terhadap parameter volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt*.
3. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian yang dilakukan sebagai berikut.

1. Dijadikan sebagai referensi dan salah satu sumber informasi dalam pengembangan teknologi perkerasan jalan raya.
2. Memberikan pengetahuan terkait penggunaan limbah serbuk besi sebagai *filler* pengganti pada campuran *stone matrix asphalt*.
3. Mengetahui kelebihan yang dihasilkan limbah serbuk besi sebagai *filler* pengganti pada campuran *stone matrix asphalt*.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Peraturan yang digunakan adalah *AASHTO*, dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.
2. Agregat kasar diperoleh dari Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII.

3. Agregat halus diperoleh dari Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII.
4. Serat selulosa yang digunakan adalah pabrikasi CF 51500.
5. Bahan pengisi yang digunakan adalah debu batu.
6. *Filler* debu batu disubstitusikan dengan limbah serbuk besi dengan kadar 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari berat agregat lolos saringan No. 200.
7. Limbah serbuk besi diperoleh dari Kota Pati, Provinsi Jawa Tengah.
8. Tidak meneliti dan menguji kandungan unsur mineral yang terkandung pada limbah serbuk besi.
9. Bahan aspal yang digunakan adalah aspal Pertamina dengan penetrasi 60/70
10. Tinjauan pengujian terhadap kekuatan struktur berdasarkan stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient*, dan *ITS*.
11. Tinjauan pengujian terhadap karakteristik volumetrik campuran aspal berdasarkan *density*, *VITM*, *VFWA*, *VMA*, dan *VCA*.
12. Tinjauan pengujian terhadap durabilitas campuran aspal berdasarkan *IRS*, *TSR*, *draindown*, dan *cantabro loss*.
13. Pengujian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII.
14. Tidak dilakukan pengujian stabilitas dinamis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fungsi *Filler* Pada Campuran Aspal Agregat Panas

Filler adalah bahan pengisi berbutir halus yang lolos saringan 200 (0,074 mm) biasanya berupa debu batu, debu kapur, semen, dan bahan lain. Fungsi dari *filler* yaitu untuk mengisi rongga antar agregat halus dan agregat kasar pada pembuatan campuran aspal panas. Penggunaan *filler* harus dalam kondisi kering dan tidak boleh menggumpal.

Tahir (2018) melakukan penelitian yang mencakup eksplorasi terhadap penggunaan campuran *filler* debu-batu dan semen dalam *Stone Matrix Asphalt* (SMA). Dalam rangkaian percobaan, variasi kadar semen yang diterapkan melibatkan persentase 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%. Hasil pengukuran *draindown* menunjukkan angka berturut-turut sebesar 0,136%, 0,236%, 0,784%, 1,455%, 1,066%, dan 1,697% untuk setiap kadar *filler* semen. Temuan penting dari penelitian ini menyatakan bahwa kadar maksimum *filler* semen dalam campuran SMA yang masih memenuhi spesifikasi adalah 20%.

2.2 Pemanfaatan Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengganti *Filler*

Dikarenakan pembangunan jalan akan meningkatkan permintaan material perkerasan salah satunya adalah *filler*. Material pengisi (*filler*) biasa yang digunakan adalah debu batu pecah, namun material tersebut sangat terbatas sehingga diperlukan material alternatif *filler* lain yang dapat digunakan sebagai pengganti debu batu pecah. Material alternatif yang digunakan adalah serbuk besi.

Serbuk besi yang dipakai pada Penelitian ini merupakan limbah akhir buangan yang dihasilkan dari sisa pengolahan pabrik atau industri. Limbah serbuk besi sangat jarang digunakan sebagai material yang bernilai efektif sehingga hanya akan menyebabkan timbulnya polusi pada lingkungan.

Utomo (2015) melakukan penelitian terkait mengeksplorasi pemanfaatan limbah serbuk besi sebagai bahan pengisi dalam campuran material. Dalam penelitian ini, variasi kadar serbuk besi digunakan, yaitu 0%, 12%, 17%, 22%, dan

27%, sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6 Tahun 2010 (Revisi 3) mengenai penggunaan material pengisi dalam campuran perkerasan jalan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran limbah serbuk besi memenuhi standar *Marshall*. Dengan kadar *filler* sebesar 22% dan waktu rendaman selama 1 jam, didapatkan nilai *VMA (Void in Mineral Aggregate)* sebesar 67,93%, nilai *VFA (Void Filled With Aggregate)* sebesar 92,91%, nilai *VIM (Void in Mix)* sebesar 4,82%, stabilitas sebesar 1371,6 kg, *flow* sebesar 4,77 mm, dan nilai *Marshall Quotient (MQ)* sebesar 288,93 kg/mm.

2.3 Pemanfaatan *Filler* Sebagai Substitusi Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Stone Matrix Asphalt (SMA) merupakan jenis campuran beraspal panas yang telah diakui secara luas sebagai campuran yang stabil, awet, dan tahan terhadap beban tinggi. Terdiri dari dua bagian utama yaitu kerangka agregat kasar (*coarse aggregate skeleton*) dan campuran agregat halus, bahan pengisi (*filler*) serta perekat berupa aspal mortar dengan kadar relatif tinggi (*rich asphalt binder mortar*), serta mempunyai kontak antar agregat kasar menjadi sebuah kerangka batuan yang disebut dengan istilah *stone-on-stone skeleton contact* untuk penyebaran beban AASHTO M 325-08 (2012).

Hidayat dan Kushari (2019) meneliti tentang potensi debu ampas tebu sebagai pengganti *filler* dalam campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara keseluruhan, debu ampas tebu layak dijadikan pengganti *filler* dalam campuran *SMA*. Penambahan jumlah debu ampas tebu yang sedikit dapat meningkatkan signifikan stabilitas perkerasan, meskipun menurunkan nilai *flow*, yang pada gilirannya dapat membuat perkerasan menjadi kaku dan lebih tahan terhadap beban berat namun rentan terhadap retak. Pada kadar debu ampas tebu sebesar 50%, nilai stabilitas menunjukkan penurunan, namun tetap lebih tinggi dibandingkan dengan kadar 0%. Meskipun demikian, nilai *flow* lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan kadar 25%, sehingga memberikan kelebihan fleksibilitas pada perkerasan. Hal ini dapat meningkatkan tahanan terhadap geser dan *crack*, namun juga berpotensi menimbulkan deformasi permanen seperti *rutting*.

2.4 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Adapun perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang terdahulu dapat pada Tabel 2.1 dihalaman selanjutnya sebagai berikut.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Tahir (2018)	Hidayat dan Kushari (2019)	Utomo (2020)	Penulis
1	Judul	Karakteristik Draindown Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> (SMA) Yang Menggunakan <i>Filler</i> Debu-Batu Dan Semen	Analisis Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> Dengan Debu Ampas Tebu Sebagai <i>Filler</i> Pengganti	Penggunaan Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengisi (<i>Filler</i>) Pada Campuran Struktur Perkerasan Jalan Kolektor Ponco – Jatirogo (Sta.130+200 – Sta.138+700)	Pengaruh Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengganti <i>Filler</i> Terhadap Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>
2	Jenis Campuran	<i>Stone Matrix Asphalt</i>	<i>Stone Matrix Asphalt</i>	Asbuton	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
3	Bahan Yang Digunakan	Debu-Batu dan Semen	Debu Ampas Tebu	Limbah Serbuk Besi	Limbah Serbuk Besi
4	Pengujian	<i>Marshall</i> dan Uji <i>Drain-Down</i>	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, dan <i>Cantabro</i>	Karakteristik <i>Marshall</i>	<i>Marshall</i> , ITS, IRS, TSR, IDP, IDK, VCA, Draindown dan <i>Cantabro</i>

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Tahir (2018)	Hidayat dan Kushari (2019)	Utomo (2020)	Penulis
5	Hasil	Semakin tinggi persentase semen dalam campuran, semakin tinggi juga nilai drain-down campuran SMA. Untuk setiap tingkat <i>filler</i> semen berturut-turut, ditemukan nilai <i>drain-down</i> masing-masing sebesar 0,136%, 0,236%, 0,784%, 1,455%, 1,066%, dan 1,697%. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa kadar maksimum <i>filler</i> semen dalam campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>	Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan kadar <i>filler</i> debu ampas tebu sebesar 25% menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran tanpa debu ampas tebu dalam menanggung beban, dikarenakan stabilitas yang tinggi. Namun, dampak dari stabilitas tinggi tersebut adalah	Hasil pengujian <i>marshall</i> pada campuran aspal dengan variasi <i>filler</i> dari limbah serbuk besi yang paling optimal dan sesuai dengan persyaratan spesifikasi Bina Marga ditemukan pada kadar <i>filler</i> sebesar 22%, dengan waktu rendaman selama 1 jam. Pada tingkat tersebut, diperoleh nilai (VMA) sebesar 67,93%,	Hasil penelitian menunjukan variasi kadar substitusi <i>filler</i> serbuk besi terbaik pada kadar 50%. Pada parameter kekuatan pada kadar substitusi optimum 50% menghasilkan campuran yang kaku dan tahan deformasi. Pada parameter volumetrik menghasilkan campuran menjadi lebih berongga. Pada substitusi titik optimum sebesar 50%

Lanjutan Tabel 2. 1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Tahir (2018)	Hidayat dan Kushari (2019)	Utomo (2020)	Penulis
5	Hasil	(SMA) yang masih memenuhi spesifikasi adalah 20%.	rendahnya tingkat plastisitas dan potensi retak (<i>cracking</i>) pada campuran tersebut. Di sisi lain, campuran dengan kadar <i>filler</i> debu ampas tebu sebesar 50% menunjukkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa <i>filler</i> debu ampas tebu, dan nilai <i>flow</i> yang meningkat membuat campuran ini lebih tahan terhadap retak (<i>cracking</i>)."	<i>void filled with aggregate (VFA)</i> sebesar 92,91%, <i>void in mix (VIM)</i> sebesar 4,82%, stabilitas sebesar 1371,6 kg, <i>flow</i> sebesar 4,77 mm, dan nilai <i>marshall quotient (MQ)</i> sebesar 288,93 kg/mm."	campuran memiliki selimut aspal dan kontak antar agregat yang baik. Pada parameter durabilitas menghasilkan campuran yang mampu menerima repetisi beban lalu lintas serta mampu menahan keausan akibat pengaruh cuaca iklim, seperti udara, air, atau perubahan temperatur.

Sumber : Tahir (2018), Hidayat dan Kushari (2019), dan Utomo (2020).

Lanjutan Tabel 2. 1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Saputra (2021)	Dewi (2019)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Penulis
1	Judul	Substitusi Parsial Agregat Halus Dengan Serbuk Besi Pada Campuran <i>Laston AC-WC</i>	Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> Dengan Bahan Tambah <i>Viatop</i> ⁶⁶ Menggunakan Variasi <i>Filler</i> Debu Batu Dan Batu Bata	Pengaruh Debu Sekam Padi Sebagai <i>Filler</i> Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	Pengaruh Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengganti <i>Filler</i> Terhadap Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>
2	Jenis Campuran	<i>Laston AC-WC</i>	<i>Stone Matrix Asphalt</i>	<i>Stone Matrix Asphalt</i>	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
3	Bahan Yang Digunakan	Limbah Serbuk Besi	Debu Batu dan Batu Bata	Debu Sekam Padi	Limbah Serbuk Besi
4	Pengujian	Karakteristik <i>Marshall</i>	<i>Marshall</i>	<i>Marshall</i> , ITS, IRS, <i>Poisson Ratio</i> , dan <i>Cantabro</i>	<i>Marshall</i> , ITS, IRS, TSR, IDP, IDK, VCA, Draindown dan <i>Cantabro</i>

Lanjutan Tabel 2. 1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Saputra (2021)	Dewi (2019)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Penulis
5	Hasil	Hasil parameter uji <i>marshall</i> pada tingkat aspal optimum (KAO) sebesar 6,4, hasil uji parameter <i>marshall</i> menunjukkan bahwa substitusi sejumlah agregat halus dengan berbagai persentase serbuk besi menghasilkan kinerja terbaik (% optimum) pada campuran laston AC-WC, yakni sebesar 15%. Pada tingkat penggantian tersebut, diperoleh nilai	Hasil penelitian terungkap bahwa kombinasi 60% <i>filler</i> batu bata dan 40% <i>filler</i> debu batu dalam campuran <i>stone matrix asphalt</i> (SMA) yang ditambahkan dengan Viatop66 memberikan kinerja yang optimal. Bukti untuk hal ini terlihat dari peningkatan hasil pemeriksaan mekanis seperti stabilitas <i>marshall</i> , <i>flow</i> , dan <i>marshall quotient</i> pada variasi tersebut, yang kemudian mengalami	Hasil penelitian terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai stabilitas pada campuran <i>stone matrix asphalt</i> (SMA) dengan ukuran butir 12,5 mm sejalan dengan peningkatan kadar <i>filler</i> pengganti aspal (ASP) hingga mencapai 50%, yakni sebesar 49,382%, namun mengalami penurunan pada kadar ASP 75% menjadi 15,025%. Peningkatan nilai <i>flow</i> mencapai 36,129%. Nilai <i>marshall quotient</i> (MQ) menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan stabilitas,	Hasil penelitian menunjukkan variasi kadar substitusi <i>filler</i> serbuk besi terbaik pada kadar 50%. Pada parameter kekuatan pada kadar substitusi optimum 50% menghasilkan campuran yang kaku dan tahan deformasi. Pada parameter volumetrik menghasilkan campuran menjadi lebih berongga.

Lanjutan Tabel 2. 1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Saputra (2021)	Dewi (2019)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Penulis
5	Hasil	<p><i>density</i> sebesar 2,38%, stabilitas sebesar 3582 kg, <i>flow</i> sebesar 3,3%, <i>Marshall Quotient (MQ)</i> sebesar 1098,77 kN/mm, <i>void in mix (VIM)</i> sebesar 3,67%, <i>Voids in The Mineral Aggregate (VMA)</i> sebesar 16,49%, dan <i>Voids Filled With Bitumen (VFB)</i> sebesar 79,84%. Seluruh variasi kadar limbah serbuk besi memenuhi persyaratan parameter <i>marshall</i>.</p>	<p>penurunan pada variasi campuran yang berikutnya.</p>	<p>meningkat hingga kadar ASP 50% dan menurun pada kadar ASP 75%. Nilai indeks retak statis (<i>IRS</i>) pada kadar <i>filler</i> ASP 0% adalah 86,997%, tidak memenuhi standar Bina Marga (2010), namun pada kadar ASP 25%, 50%, dan 75% memenuhi standar dengan nilai masing-masing 93,755%, 90,449%, dan 93,901%. Nilai indeks tanah serangga (<i>ITS</i>) mengalami peningkatan sebesar 11,270% pada kadar <i>filler</i> ASP 25% dari kondisi awal, kemudian</p>	<p>Pada substitusi titik optimum sebesar 50% campuran memiliki selimut aspal dan kontak antar agregat yang baik. Pada parameter durabilitas menghasilkan campuran yang mampu menerima repetisi beban lalu lintas serta mampu menahan keausan akibat pengaruh cuaca iklim, seperti udara,</p>

Lanjutan Tabel 2. 1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

No	Aspek	Peneliti			
		Saputra (2021)	Dewi (2019)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Penulis
5	Hasil	.		mengalami penurunan seiring peningkatan kadar ASP. Nilai <i>cantabro loss</i> pada kadar <i>filler</i> ASP 0%, 25%, dan 50% memenuhi persyaratan, yakni masing - masing sebesar 4,964%, 7,592%, dan 10,730%, sedangkan pada kadar ASP 75% melampaui batas dengan nilai 45,98%. Selain itu, angka <i>poisson</i> juga mengalami peningkatan sebesar 37,187% seiring bertambahnya kadar <i>filler</i> pengganti ASP."	air, atau perubahan temperatur.

Sumber : Saputra (2021), Dewi (2019), dan Hidayati dan Fauziah (2018).

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Lentur Jalan

Perkerasan lentur jalan adalah jenis perkerasan jalan yang dirancang untuk menahan beban kendaraan dan beban lalu lintas dan pada umumnya menggunakan bahan yang fleksibel yaitu aspal. Perkerasan lentur jalan dirancang dengan ketebalan yang bervariasi tergantung pada beban yang akan ditahan dan kondisi tanah dibawahnya. Keuntungan menggunakan perkerasan lentur jalan adalah dapat menahan deformasi akibat beban kendaraan dan cuaca yang berubah-ubah, serta memiliki kemampuan meredam getaran dan kebisingan dari lalu lintas. Selain itu, perawatan perkerasan lentur jalan juga relatif mudah dan biayanya lebih rendah dibandingkan dengan perkerasan kaku seperti beton. Sukirman (2010) menyatakan pada umumnya perkerasan lentur baik digunakan untuk jalan yang melayani beban lalu lintas ringan sampai dengan sedang, seperti jalan perkotaan, jalan dengan sistem utilitas terletak di bawah perkerasan jalan, perkerasan bahu jalan, atau perkerasan dengan konstruksi bertahap.

3.2 Limbah Serbuk Besi

Besi adalah logam yang berasal dari biji besi hasil tambang yang banyak digunakan untuk untuk kehidupan sehari-hari. Pengolahan besi menghasilkan limbah sisa hasil pengolahan berupa serbuk besi. Limbah serbuk besi merupakan hasil sisa pekerjaan pemotongan ataupun pembubutan besi hasil pemakaian di industri. Serbuk besi sendiri memiliki sifat sinter yaitu pengikatan suatu partikel dalam proses pemanasan dan juga dengan adanya kandungan silika (Si) dengan persentase 1-3% dari seluruh kandungan kimia besi sehingga menjadi lem atau zat perekat, serta memiliki sifat tahan gesek, dan membuat struktur menjadi lebih keras. Berikut ini merupakan kandungan kimia yang terdapat pada limbah serbuk besi menurut Daryus (2018) dalam Saputra (2021) dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Kandungan Kimia Limbah Serbuk Besi

Kandungan Kimia	Persentase (%)
Silikon (Si)	1-3
Carbon (C)	2-4
Mangan (Mn)	0,8
Fospor (P)	0,1
Sulfur (S)	0,05
Besi (Fe)	Sisa

Sumber : Daryus (2018)

3.3 Karakteristik Beton Aspal

Beton aspal adalah jenis perkerasan jalan yang terdiri dari campuran agregat dan aspal secara homogen, dengan atau tanpa bahan tambahan. Material-material pembentuk beton aspal dicampur di instalasi pencampur pada suhu tertentu, kemudian diangkut ke lokasi, dihamparkan, dan dipadatkan (Sukirman, 2016). Karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh beton aspal adalah sebagai berikut:

3.3.1 Kelenturan (*Flexibility*)

Kelenturan (*flexibility*) merupakan kemampuan aspal beton untuk menahan beban lalu lintas dan perubahan suhu tanpa mengalami deformasi permanen atau tanpa terjadi retak. Perkerasan jalan yang terbuat dari beton aspal dapat menyesuaikan diri dengan deformasi dan getaran dari beton dapat menyesuaikan diri dengan perubahan deformasi dan getaran akibat dilalui beban lalu lintas, sehingga meminimalkan kerusakan dan mengurangi biaya perawatan. Kelenturan dapat ditingkatkan dengan menggunakan agregat yang bergradasi terbuka dengan penggunaan kadar aspal yang tinggi.

3.3.2 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas (*stability*) merupakan kemampuan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk permanen seperti gelombang, alur, dan blending. Kebutuhan stabilitas jalan menyesuaikan dengan kebutuhan, untuk jalan dengan volume lalu lintas tinggi maka digunakan perkerasan jalan dengan stabilitas yang tinggi, begitu juga sebaliknya. Stabilitas dipengaruhi oleh

beberapa faktor seperti gesekan internal yang terjadi antara butir agregat yang saling mengunci dan kohesi atau gaya ikat aspal yang beraspal dari daya lekatnya, sehingga dapat memelihara tekanan kontak antar butir agregat.

3.3.3 Keawetan (*Durability*)

Keawetan (*durability*) adalah kemampuan beton aspal menerima repetisi beban lalu lintas seperti berat kendaraan, gesekan antara roda kendaraan dan permukaan jalan, serta menahan keausan akibat pengaruh cuaca dan iklim, seperti udara, air, atau perubahan temperatur. Durabilitas beton aspal dipengaruhi oleh tebalnya film atau selimut aspal, banyaknya rongga dalam campuran, kepadatan dan kedap airnya campuran (Sukirman, 2016).

3.3.4 Kekesatan (*Skid Resistance*)

Kekesatan (*skid resistance*) adalah kemampuan pada perkerasan jalan dalam memberikan gaya gesek terhadap ban kendaraan, sehingga kendaraan dapat bergerak dengan aman terkendali. Tahanan geser dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis aspal, agregat, dan pola permukaan jalan. Permukaan jalan yang kasar dan berpori dapat meningkatkan tahanan geser, sedangkan permukaan yang halus dan licin dapat menurunkan tahanan geser.

3.3.5 Ketahanan Terhadap Kelelahan (*Fatigue Resistance*)

Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) adalah kemampuan beton aspal menerima lendutan berulang akibat repetisi beban lalu lintas, tanpa terjadinya kelelahan berupa alur dan atau retak. Hal ini dapat dicapai jika menggunakan kadar aspal yang tinggi (Sukirman, 2016).

3.3.6 Kedap Air (*Impermeabilitas*)

Kedap air (*impermeabilitas*) adalah kemampuan beton aspal untuk menahan masuknya air dan udara. Dengan adanya air dan udara dapat mengakibatkan beberapa hal yang merugikan seperti mempercepat penuaan aspal, serta terkelupasnya selimut aspal dari permukaan agregat. Beton aspal sering digunakan sebagai lapisan atas pada jalan raya dan bandara, dan kemampuan kedap terhadap air dan udara sangat penting untuk menjaga stabilitas dan daya tahan infrastruktur tersebut.

3.3.7 Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*)

Kemudahan pelaksanaan (*workability*) adalah kemampuan campuran beton aspal untuk mudah dihamparkan dan dipadatkan. Tingkat kemudahan dalam pelaksanaan, menentukan tingkat kemudahan dalam proses penghamparan dan pemadatan adalah viskositas aspal, kepekaan aspal terhadap perubahan *temperature*, dan gradasi serta kondisi agregat. Revisi atau koreksi terhadap rancangan campuran dapat dilakukan jika ditemukan kesukaran dalam pelaksanaan (Sukirman, 2016).

3.4 Material Penyusun Perkerasan Lentur Jalan

Perkerasan lentur jalan terdiri dari beberapa material penyusun yang berbeda, yang dirancang untuk menahan beban lalu lintas dan memperpanjang umur jalan. Pada umumnya material penyusun perkerasan lentur diantaranya adalah agregat, aspal, dan *filler*. Pemilihan material perkerasan lentur jalan tergantung pada faktor-faktor tertentu seperti beban lalu lintas, kondisi lingkungan, dan biaya. Sehingga pemilihan material yang tepat dapat meningkatkan umur jalan dan mengurangi biaya perawatan.

3.4.1 Agregat

Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90%-95% agregat berdasarkan persentase berat, atau 75%-85% agregat berdasarkan persentase volume. Dengan demikian kualitas perkerasan jalan ditentukan dari sifat agregat dan hasil campuran agregat dengan material lain (Sukirman, 2016).

Agregat memiliki fungsi penting dalam perkerasan lentur jalan yaitu menahan beban lalu lintas. Sehingga perlunya pemilihan agregat yang tepat agar dapat meningkatkan kualitas dan umur perkerasan jalan. Agregat dibedakan menjadi agregat kasar dan agregat halus berdasarkan atas ukuran butirnya.

1. Agregat kasar

Adapun persyaratan dari agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3.2 dibawah ini.

Tabel 3.2 Persyaratan Agregat Kasar

Pengujian	Standar	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium atau magnesium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12 %
Abrasi dengan mesin <i>loss angeles</i>	SNI 2417:2008	Maks. 30%
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439:2008	Min. 95 %
Angularitas	ASTM D 5821-01	100/90 ⁽¹⁾
Partikel pipih dan lonjong (Perbandingan 1:5)	RSNI T-01-2005	Maks. 5 %
Material lolos ayakan No.200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%

Catatan :

- 1) 100/90 menunjukkan bahwa 100% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai bidang pecah dua atau lebih.

Sumber : Bina Marga (2020)

2. Agregat Halus

Adapun persyaratan dari agregat halus dapat dilihat pada Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Halus

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai setara pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10 %
Uji kadar rongga tanpa pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45 %
Gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%

Sumber : Bina Marga (2020)

3.4.2 Gradasi Agregat

Gradasi agregat merupakan susunan dari butir agregat yang disesuaikan berdasarkan ukurannya. Gradasi agregat didapat dari hasil pengujian dan analisis satu set ayakan, dengan ayakan paling besar berada diatas dan semakin kebawah semakin kecil. Gradasi agregat yang baik sangat penting untuk mencapai kekuatan, stabilitas, dan ketahanan yang optimal pada perkerasan jalan. Berikut ini

merupakan persyaratan gradasi agregat untuk campuran *Stone Matrix Asphalt* dapat dilihat pada Tabel 3.4 dibawah ini.

Tabel 3.4 Gradasi Agregat Gdebungan Campuran SMA

Ukuran Ayakan		% Berat yang lolos	
ASTM	(mm)	SMA 25 mm (Tebal rancangan min. 5,0 cm)	SMA Halus (Tebal rancangan min. 4,0 cm)
1"	25	100	
$\frac{3}{4}$ "	19	90-100	100
$\frac{1}{2}$ "	12,5	50-88	90-100
$\frac{3}{8}$ "	9,5	25-60	50-80
No. 4	4,75	20-28	20-35
No. 8	2,36	16-24	16-24
No. 200	0,075	8-11	8-11

Sumber : Bina Marga (2020)

3.4.3 Aspal

Aspal adalah suatu bahan material yang berbentuk padat atau setengah padat yang bersifat perekat (*cementious*) yang akan melembek dan meleleh bila dipanasi. pada pembuatan jalan. Aspal dihasilkan dari proses penyulingan minyak bumi sehingga akan memiliki bentuk fisik sama seperti minyak bumi yaitu berwarna hitam sampai coklat gelap. Aspal juga memiliki sifat viskoelastis yang merupakan perpaduan antara sifat kental (viskos) dan elastis yang di mana itu untuk menentukan pada temperatur berapa pencampuran aspal dengan agregat dapat dilakukan dan terciptanya campuran yang homogen. Pada penelitian ini digunakan aspal pen 60/70. Berikut ini adalah persyaratan dari aspal keras AC 60/70 dapat dilihat pada Tabel 3.5 dibawah ini.

Tabel 3.5 Persyaratan Aspal Keras AC 60/70

No .	Jenis Pengujian	Standar	Nilai Persyaratan
1	Berat jenis	SNI 2441: 2011	$\geq 1,0$
2	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60 - 70
3	Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
4	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232
5	Kelarutan dalam TCE (%)	AASHTO T44-14	≥ 99
6	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48

Sumber : Bina Marga (2020)

3.4.4 Bahan Aditif

Bahan aditif merupakan material yang ditambahkan pada campuran aspal untuk memperbaiki ketahanan performa dan sebagai stabilitas pada aspal. Dalam campuran *Stone Matrix Asphalt* digunakan serat selulosa sebagai alternatif bahan aditif yang dapat digunakan. Serat selulosa digunakan untuk menaikkan titik lembek aspal, viskositas, dan menurunkan penetrasi. Berikut ini adalah persyaratan dari serat selulosa dapat dilihat pada Tabel 3.6 dibawah ini.

Tabel 3.6 Persyaratan Serat Selulosa

Pengujian	Satuan	Persyaratan
Serat :		
Panjang serat	mm	Maks. 6,35
Lolos ayakan No. 20	%	85 ± 10
No. 40	%	40 ± 10
No. 140	%	30 ± 10
pH	-	$7,5 \pm 1,0$
Absorsi minyak	-	$7,5 \pm 1,0$ kali berat serat selulosa
Kadar air	%	Maks. 5

Lanjutan Tabel 3.6 Persyaratan Serat Selulosa

Pengujian		Satuan	Persyaratan
Pelet			
Selulosa			
Pelet			
-	Diameter	mm	3,8-4,0
-	Panjang	mm	5,9-6,1

Sumber : Bina Marga (2020)

3.4.5 Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi (*filler*) adalah mineral agregat yang umumnya lolos saringan no.200. *Filler* atau bahan pengisi ini akan mengisi rongga antara partikel agregat kasar dalam rangka mengurangi besarnya rongga, meningkatkan kerapatan dan stabilitas dari massa tersebut. Rongga udara pada agregat kasar diisi dengan partikel yang lolos saringan 200, sehingga membuat rongga udara lebih kecil dan kerapatan massanya lebih besar (Sukirman, 2003).

3.5 Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)

Stone Matrix Asphalt (SMA) adalah jenis campuran panas yang dirancang untuk memberikan permukaan jalan yang tahan lama dan mempunyai ketahanan gelincir (*skid resistant*). Pada campuran SMA mempunyai gradasi celah yang tinggi dan mengandung agregat kasar yang tinggi dan proporsi agregat halus yang relative rendah. Oleh sebab itu campuran SMA tahan terhadap deformasi (*rutting*) sehingga mampu untuk menahan beban kendaraan yang berat. Berikut ini adalah persyaratan dari *Stone Matrix Asphalt* dapat dilihat pada Tabel 3.7 dibawah ini.

Tabel 3.7 Persyaratan *Stone Matrix Asphalt*

Sifat-sifat campuran		Persyaratan	
		SMA	SMA Mod
Jumlah tumbukan per bidang		50	
Rongga dalam campuran (VIM), %	Min.	3,0	
	Maks.	5,0	
Rongga dalam agregat (VMA), %	Min.	17	
Rasio VCA_{MIX}/VCA_{DRC}		< 1	

Lanjutan Tabel 3.7 Persyaratan Stone Matrix Asphalt

Sifat-sifat campuran		Persyaratan	
		SMA	SMA Mod
<i>Draindown</i> pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam)	Maks.	0,3	
Stabilitas <i>marshall</i> , kg	Min.	600	750
Pelelehan, mm	Min.	2	
	Maks.	4,5	
Stabilitas <i>marshall</i> Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min.	90	
Stabilitas dinamis, lintasan/mm	Min.	2500	3000

Sumber : Bina Marga (2020)

3.6 Karakteristik Pengujian *Marshall*

Pengujian *marshall* adalah suatu metode pengujian yang digunakan untuk menentukan sifat-sifat dari campuran aspal panas. Karakteristik pengujian *marshall* diantaranya adalah stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *marshall quotient*, *VITM* (*Void In The Total Mix*), *VFWA* (*Void Filled With Asphalt*), *VMA* (*Void in Mineral Aggregate*), dan kepadatan (*density*).

3.6.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas (*stability*) pada campuran aspal adalah kemampuan untuk menahan beban vertikal tanpa mengalami deformasi yang berarti. Nilai stabilitas pada pengujian *marshall* dihitung berdasarkan gaya maksimum yang diperlukan untuk menghancurkan sampel aspal ketika ditekan secara vertikal. Semakin tinggi nilai stabilitas pada pengujian *marshall*, semakin baik kualitas campuran aspal. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai stabilitas dapat dilihat pada Persamaan 3.1, untuk grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai stabilitas dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.

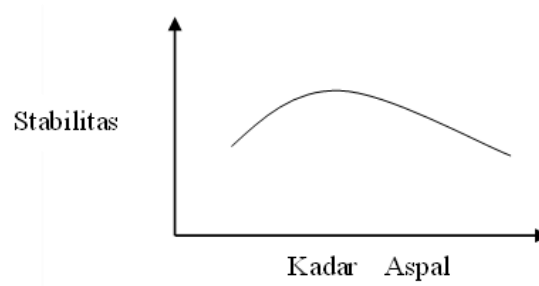
$$q = p \times s \quad (3.1)$$

keterangan :

q = angka stabilitas,

p = pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat, dan

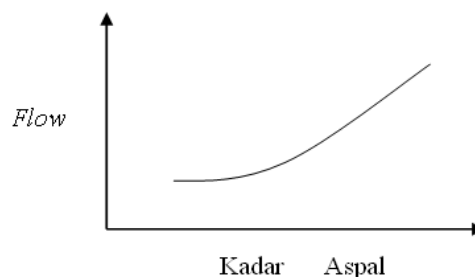
s = angka koreksi tebal benda uji.



Gambar 3.1 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai Stabilitas
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.2 Kelelahan (*Flow*)

Kelelahan (*flow*) pada campuran aspal adalah kemampuan campuran aspal untuk mengalir atau mengalami deformasi pada suhu tinggi dan beban berulang. Nilai *flow* didapat dari pembacaan pada *flowmeter*, pada saat pengujian *marshall*. *Flowmeter* diperoleh untuk mengukur besarnya deformasi yang terjadi akibat beban. Nilai *flow* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kadar dan kekentalan aspal, gradasi agregat, dan pemadatan. Berikut ini adalah grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *flow* dapat dilihat pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai Flow
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.3 Marshall Quotient

Marshall quotient merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dengan nilai kelelahan (*flow*). Nilai *marshall quotient* yang tinggi didapat dari campuran dengan nilai stabilitas tinggi dan nilai kelelahan rendah, dan sebaliknya dengan nilai stabilitas rendah dan nilai kelelahan tinggi maka menghasilkan nilai *marshall quotient* yang rendah. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai *marshall*

quotient dapat dilihat pada Persamaan 3.2, untuk grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *marshall quotient* dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.

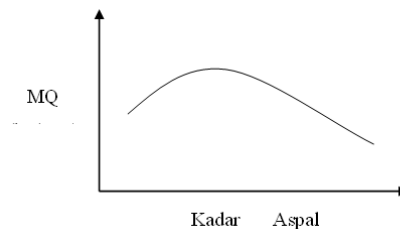
$$MQ = \frac{q}{r} \quad (3.2)$$

keterangan :

MQ = nilai *marshall quotient* (kg/mm),

q = nilai stabilitas (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).



Gambar 3.3 Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai Marshall Quotient
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.4 VITM (Void in the Total Mix)

VITM (Void in The Total Mix) merupakan persentase perbandingan volume persen rongga terhadap volume total campuran padat. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai VITM dapat dilihat pada Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4, untuk grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai VITM dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.

$$n = 100 - \left(100 - \frac{g}{h} \right) \quad (3.3)$$

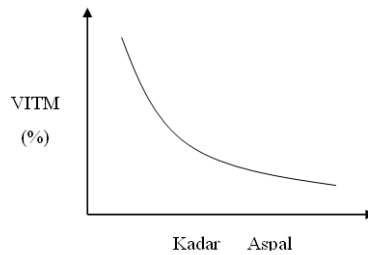
$$h = 100 - \left(\frac{100}{\left(\frac{\% \text{ Agregat}}{BJ \text{ Agregat}} + \frac{\% \text{ Aspal}}{BJ \text{ Aspal}} \right)} \right) \quad (3.4)$$

keterangan :

n = nilai *VITM*,

g = berat isi sampel (gr/cc), dan

h = berat jenis maksimum teoritis campuran.



Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai *VITM*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.5 *VFWA (Void Filled With Asphalt)*

VFWA (Void Filled With Asphalt) merupakan volume udara beton aspal padat yang terisi oleh aspal. Maka aspal tersebut berfungsi untuk menyelimuti butiran agregat di dalam beton aspal padat. Nilai *VFWA* yang besar menyebabkan aspal yang mengisi di dalam rongga semakin banyak, maka campuran semakin kedap terhadap air dan udara, dan sebaliknya jika nilai *VFWA* kecil maka makin rendah campuran untuk kedap terhadap air dan udara. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai *VFWA* dapat dilihat pada Persamaan 3.5 sampai Persamaan 3.9, untuk grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut.

1. Persentase aspal terhadap campuran

$$b = \frac{a}{100 + a} \times 100 \quad (3.5)$$

keterangan :

a = persentase aspal terhadap batuan, dan

b = persentase aspal terhadap campuran.

2. Persentase aspal terhadap agregat

$$m = 100 \times \frac{i}{l} \quad (3.6)$$

$$i = \frac{b \times g}{BJ \text{ Aspal}} \quad (3.7)$$

$$l = 100 - j \quad (3.8)$$

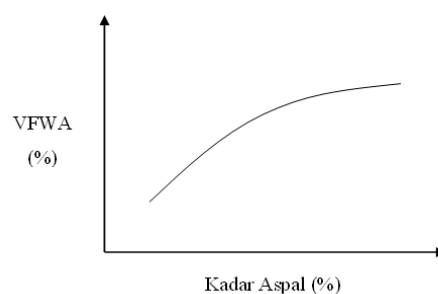
$$j = \left(\frac{(100 - b) \times g}{BJ \text{ Agregat}} \right) \quad (3.9)$$

keterangan :

m = VFWA (%),

g = berat isi sampel (gr/cc), dan

b = persentase aspal terhadap campuran.



Gambar 3.5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai VFWA

(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.6 VMA (Void in Mineral Aggregate)

VMA (Void in Mineral Aggregate) merupakan banyaknya rongga di antara butir-butir agregat di dalam aspal padat. Hasil dari VMA dinyatakan dalam bentuk persentase. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai VMA dapat dilihat pada Persamaan 3.10 dan Persamaan 3.11, untuk grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai VMA dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.

$$l = 100 - j \quad (3.10)$$

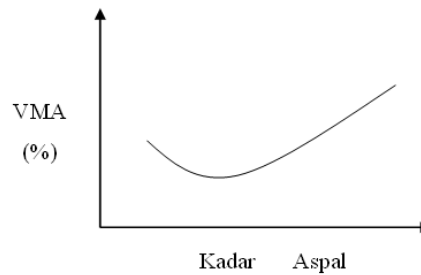
$$j = \frac{(100 - b) \times g}{BJ \text{ Agregat}} \quad (3.11)$$

keterangan :

l = nilai VMA (%),

b = persentase aspal terhadap campuran (%), dan

g = berat isi sampel (gr/cc).



Gambar 3.6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai VMA

(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.7 Kepadatan (*Density*)

Kepadatan (*density*) merupakan suatu indikator tingkat kepadatan pada campuran aspal yang telah dipadatkan. Nilai *density* yang besar maka akan menyebabkan kerapatannya meningkat semakin baik. Berikut ini adalah rumus untuk menghitung nilai *density* dapat dilihat pada Persamaan 3.12 dan Persamaan 3.13, untuk grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *density* dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.

$$g = \frac{c}{f} \quad (3.12)$$

$$f = d - e \quad (3.13)$$

keterangan :

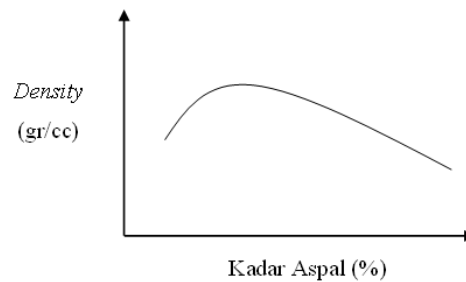
g = nilai *density* (gr/cc),

c = berat benda uji sebelum direndam (gr),

d = berat benda uji dalam keadaan jenuh / SSD (gr),

e = berat dalam air (gr), dan

f = volume / isi (cm³).



Gambar 3.7 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal Dan Nilai *Density*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.7 Pengujian Perendaman *Index of Retained Strength (IRS)*

Pengujian *immersion (IRS)* merupakan suatu metode untuk mengevaluasi pengaruh air terhadap suatu campuran aspal. Hasil dari IRS merupakan persentase nilai dari stabilitas campuran terhadap rendaman selama 0,5 jam dan 24 jam (S_2) dengan dibandingkan dengan stabilitas campuran biasa (S_1). Nilai dari *IRS* dapat dihitung dengan Persamaan 3.14.

$$\text{Index of retained strength} = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (3.14)$$

keterangan :

S_1 = stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam, dan

S_2 = stabilitas setelah direndam selama 24 jam.

3.8 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengetahui nilai gaya tarik terhadap *asphalt concrete*. Pada *ITS* memiliki sifat berupa kegagalan terhadap gaya tarik sehingga berguna untuk memperkirakan potensial retakan. Pada perkerasan jalan ketika menerima beban lalu lintas, maka pada material lapisan permukaan bagian atas akan memperoleh gaya tekan sedangkan lapisan permukaan bagian bawah akan memperoleh gaya tarik. Nilai dari *ITS* dapat dihitung dengan Persamaan 3.15.

$$ITS = \frac{P_{runtuh}}{h} \times A_0 \quad (3.15)$$

keterangan :

ITS = kuat tarik tidak langsung (kg/cm^2),

P_{runtuh} = beban puncak (kg),

h = tinggi sampel (cm), dan

A_0 = konstanta.

3.9 Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)*

Tensile Strength Ratio (TSR) atau indeks kuat tarik tidak langsung yang dihasilkan dari variasi perendaman. Persyaratan minimum *TSR* adalah harus lebih besar dari 80%. Nilai *TSR* dapat diperoleh melalui Persamaan 3.16.

$$TSR = (T_2/T_1) \times 100 \quad (3.16)$$

keterangan :

S_1 = rata-rata nilai ITS tanpa rendaman, dan

S_2 = rata-rata nilai ITS setelah perendaman 24 jam (kg).

3.10 Pengujian *Draindown*

Draindown merupakan kondisi dimana agregat dan aspal memisahkan diri dari sampel secara keseluruhan dan mengalir ke bawah dari campuran tersebut (pengaliran aspal). Pengujian ini dilakukan pada campuran dengan kadar aspal optimum untuk memastikan bahwa pengaliran aspal yang terjadi dari campuran SMA sesuai dengan spesifikasi yang ada. Spesifikasi *draindown* untuk campuran *Stone Matriks Aspal (SMA)* adalah $< 0,3\%$ dari berat campuran (SNI 8129:2015). Nilai dari *draindown* dapat dihitung dengan Persamaan 3.17.

$$Draindown = \frac{A-B}{C} \times 100 \quad (3.17)$$

keterangan :

Draindown = persentase agregat dan aspal yang tertinggal (%),

- A = berat akhir piring penampung (gr),
 B = berat awal piring penampung (gr), dan
 C = berat awal jumlah campuran yang diuji (gr).

3.11 Pengujian *Cantabro Loss*

Pengujian *cantabro loss* merupakan sebuah metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui hilang berat dari benda uji setelah dilakukan tes abrasi dengan menggunakan mesin *los angeles*. Benda uji ditimbang terlebih dahulu sebelum dimasukkan kedalam mesin *los angeles*, bertujuan untuk mendapatkan berat awal sebelum abrasi (M_o). Selanjutnya benda uji dimasukkan ke dalam drum mesin *los angeles* tanpa bola baja. Jalankan mesin *los angeles* dengan kecepatan antara 30-33 rpm sebanyak 300 putaran. Setelah mesin selai berputar, keluarkan benda uji dan lakukan penimbangan benda uji untuk mendapatkan berat setelah abrasi (M_i). Kehilangan berat dapat diperoleh dengan Persamaan 3.18.

$$L = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100\% \quad (3.18)$$

keterangan :

- M_o = berat sebelum diabrasi (gr),
 M_i = berat setelah diabrasi (gr), dan
 L = persentase kehilangan berat(%).

3.12 Indeks Durabilitas Pertama (IDP)

Indeks Durabilitas Pertama (IDP) adalah jumlah kelayakan yang berurut dan kurva keawetan (durabilitas). Nilai 'r' positif menandakan bahwa kehilangan kekuatan dan nilai 'r' negative merupakan penambahan kekuatan. Nilai dari IDP dapat dihitung dengan Persamaan 3.19.

$$IDP (r) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{S_i - (S_{i+1})}{(t_{i+1}) - 1} \times 100 \quad (3.19)$$

keterangan :

- r = indeks Penurunan Stabilitas (%),

- S_i = persentase kekuatan sisa pada waktu t_i (%),
 S_{i+1} = persentase kekuatan sisa pada waktu t_{i+1} (%), dan
 T_i, t_{i+1} = periode perendaman (dimulai dari awal pengujian).

3.13 Indeks Durabilitas Kedua (IDK)

Indeks Durabilitas Kedua (IDK) adalah luas kehilangan kekuatan rata-rata antara keawetan dengan garis $S_0 = 100\%$. Nilai 'a' positif menandakan bahwa kehilangan kekuatan dan nilai 'a' negatif merupakan penambahan kekuatan. Nilai IDK juga dapat dinyatakan dalam bentuk nilai absolut dari ekuivalen kehilangan kekuatan dalam (kg). Nilai dari IDK dapat dihitung dengan Persamaan 3.20.

$$IDK(a) = \frac{1}{2tn} \sum_{i=0}^{n-1} (S_i - (S_i + 1)) [2tn + (t_i + (t_i + 1))] \quad (3.20)$$

keterangan :

- a = kehilangan kekuatan rerata satu hari (%),
 tn = total waktu perendaman (jam),
 S_i = persentase kekuatan sisa pada waktu t_i (%),
 S_{i+1} = persentase kekuatan sisa pada waktu t_{i+1} (%), dan
 T_i, t_{i+1} = periode perendaman (dimulai dari awal pengujian).

Indeks durabilitas ini digunakan untuk mengukur tingkat kekuatan dalam satu hari. Nilai "a" yang positif menunjukkan penurunan kekuatan, sedangkan nilai negatif menunjukkan peningkatan kekuatan. Dengan demikian, nilai "a" harus kurang dari 100 berdasarkan definisi tersebut. Hal ini memungkinkan untuk menghitung persentase ekuivalen dari kekuatan sisa dalam satu hari (S_a). Nilai tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 3.21 berikut.

$$S_a = (100 - a) \quad (3.21)$$

Nilai Indeks Durabilitas Kedua juga dapat dinyatakan dalam bentuk nilai absolut dari ekuivalen kehilangan kekuatan dalam (kg) dengan Persamaan 3.22 dan Persamaan 3.23 berikut.

$$A = \frac{a}{100} \times S_0 \quad (3.22)$$

$$SA = (S_o - a) \quad (3.23)$$

3.14 Void in Coarse Aggregate (VCA)

Void in Coarse Aggregate (VCA) adalah pengujian yang digunakan untuk menentukan volume pori atau ruang kosong yang terdapat pada agregat kasar pada campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kepadatan pada campuran aspal dan membantu mengevaluasi kualitas agregat kasar. Spesifikasi AASHTO mensyaratkan bahwa nilai VCA_{mix} harus lebih kecil dari nilai VCA_{drc} . Nilai dari VCA_{DRC} dapat dihitung dengan Persamaan 3.24, dan nilai VCA_{mix} dapat dihitung dengan Persamaan 3.25.

$$VCA_{DRC} = \frac{G_{CA}Y_w - Y_s}{G_{CA}Y_w} \times 100 \quad (3.24)$$

keterangan :

VCA_{drc} = volume pori antara agregat kasar pada kondisi *dry-rodded*,

G_{CA} = berat jenis *bulk* dari fraksi campuran agregat kasar,

Y_s = berat satuan fraksi agregat kasar dalam kondisi *dry-rodded* (kg/m^3), dan

Y_w = berat satuan air (kg/m^3), tergantung temperature pengukuran.

$$VCA_{mix} = 100 - (G_{mb}/G_{CA}).P_{CA} \quad (3.25)$$

keterangan :

VCA_{mix} = volume pori antara agregat kasar pada campuran SMA yang dipadatkan,

G_{mb} = berat jenis *bulk* campuran aspal yang telah dipadatkan,

G_{CA} = berat jenis *bulk* dari fraksi campuran agregat kasar, dan

P_{CA} = prosentasi fraksi campuran agregat kasar dalam total campuran aspal.

3.15 Analisis Statistik ANOVA

Uji statistik merupakan rumus-rumus yang berhubungan dengan distribusi tertentu dalam pengujian hipotesis. Uji statistik merupakan perhitungan untuk menduga parameter data sampel yang di ambil secara random dari sebuah populasi. Untuk menentukan kesimpulan dari penelitian ini digunakan ANOVA. Menurut

Sugiyono (2010) ANOVA atau Analysis of Variance merupakan sebuah analisis statistik yang digunakan untuk menguji hipotesis komparatif rata-rata sampel bila datanya berbentuk interval atau ratio.

Penelitian ini akan menggunakan one way ANOVA, yaitu analisis varian klarifikasi tunggal. Langkah-langkah pengujian dengan one way ANOVA adalah sebagai berikut. Menghitung jumlah kuadrat total (JK_{tot}).

$$JK_{tot} = \sum X_{tot}^2 - \frac{(\sum X_{tot})^2}{N} \quad (3.26)$$

Keterangan:

N = jumlah seluruh anggota sampel

1. Menghitung jumlah kuadrat antar kelompok (JK_{ant})

$$JK_{ant} = \sum \frac{(\sum x_{kel})^2}{n_{kel}} - \frac{(\sum x_{tot})^2}{N} \quad (3.27)$$

2. Menghitung jumlah kuadrat dalam kelompok (JK_{dal})

$$JK_{dal} = JK_{tot} - JK_{ant} \quad (3.28)$$

3. Menghitung *Mean* kuadrat antar kelompok (MK_{ant})

$$MK_{ant} = \frac{JK_{ant}}{m-1} \quad (3.29)$$

4. Menghitung *Mean* kuadrat dalam kelompok (MK_{dal})

$$MK_{dal} = \frac{JK_{dal}}{N-m} \quad (3.30)$$

5. Menghitung F hitung (F_{hit})

$$F_{hit} = \frac{MK_{ant}}{MK_{dal}} \quad (3.31)$$

6. Membandingkan nilai F hitung dengan F Tabel, dengan dk pembilang ($m-1$) dan dk penyebut ($N-1$). Harga F hasil perhitungan tersebut selanjutnya akan disebut F hitung (F_h), yang berdistribusi F dengan dk pembilang ($m-1$) dan dk penyebut ($N-1$) tertentu. Ketentuan pengujian hipotesis: bila harga F hitung lebih kecil atau sama dengan harga F Tabel ($F_h \leq F_t$) maka H_0 diterima dan H_a ditolak, sebaliknya bila $F_h > F_t$, maka H_a diterima dan H_0 ditolak.
7. Membuat kesimpulan dari pengujian hipotesis: H_0 diterima atau ditolak.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu dengan melakukan serangkaian kegiatan percobaan atau pengamatan untuk mendapatkan data. Data yang diperoleh akan diolah terlebih dahulu untuk mendapatkan hasil penelitian, kemudian dibandingkan dengan persyaratan atau standar spesifikasi yang digunakan.

Standar spesifikasi dan prosedur penelitian yang digunakan mengacu peraturan *American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO)*, dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *non-probability sampling*, yaitu jenis sampel tidak dipilih secara acak. *Non-probability sampling* yang digunakan adalah *purposive sampling*, yaitu sampel diambil dengan berdasarkan tujuan. Dalam penelitian ini bahwa sampel yang digunakan telah disesuaikan dengan kriteria tertentu yang sudah ditentukan berdasarkan tujuan penelitian. Penelitian ini akan dilakukan menggunakan *filler* limbah serbuk besi yang didapatkan dari Kota Pati, Provinsi Jawa Tengah. Aspal yang digunakan adalah Pertamina Pen 60/70.

4.3 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data yang akan dilakukan pada penelitian ini yaitu selama pengujian. Dilakukan pengelompokan benda uji untuk mempermudah dalam pengambilan data, maka dilakukan pengelompokan benda uji sehingga didapatkan berupa nilai *stabilitas*, *flow*, *MQ*, *density*, *VITM*, *VMA*, *VFWA*, *VCA*, nilai *ITS*, nilai *IDK*, nilai *IDP*, nilai *IRS*, nilai *TSR*, *draindown* dan nilai *contabro loss*.

4.4 Tahapan Penelitian

Seluruh rangkaian penelitian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Tahapan-tahapan penelitian yang akan dilakukan adalah persiapan dan pemeriksaan, persiapan alat, pembuatan benda uji, perencanaan campuran, pembuatan campuran benda uji, pengujian *marshall*, pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*, pengujian *Tensile Strength Rasio (TSR)*, pengujian *Indeks of Retained Strength (IRS)*, pengujian *draindown*, dan pengujian *cantrabro loss*.

4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material

Pada penelitian ini material yang digunakan dalam pembuatan benda uji campuran *Stone Matrix Asphalt* dalam penelitian ini, yaitu agregat, *filler*, dan aspal. Material serat selulosa yang dipakai tidak dilakukan pengujian dikarenakan menggunakan pabrikan. Spesifikasi yang digunakan sebagai acuan yaitu *AASHTO*, dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

1. Pengujian Agregat

- a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar mengacu pada SNI 1969:2016

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis semu, berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), dan angka penyerapan air.

- b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus mengacu pada SNI 1970:2016

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis semu, berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), dan angka penyerapan air.

- c. Pengujian Kelekatan Agregat Terhadap Aspal mengacu pada SNI 2439:2011
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kelekatan agregat terhadap aspal.

- d. Pengujian *sand equivalent* mengacu pada SNI 03-4428-1997

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar lumpur atau debu maupun bahan lempung pada agregat halus.

- e. Pengujian abrasi pada mesin *los angeles* mengacu pada SNI 2417:2008

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat ketahanan agregat kasar akibat keausan dengan menggunakan mesin *los angeles*.

f. Pengujian analisa saringan mengacu pada SNI ASTM C136-2012

Pengujian ini menggunakan satu set saringan yang bertujuan untuk menentukan gradasi agregat kasar, agregat halus dan *filler*.

2. Pengujian Aspal

Aspal merupakan bahan pengikat antar agregat pada campuran perkerasan. Penelitian ini menggunakan bahan ikat aspal AC 60/70. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kualitas aspal adalah sebagai berikut.

a. Pengujian berat jenis aspal mengacu pada SNI 2441:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis aspal yang akan digunakan.

b. Pengujian daktilitas mengacu pada SNI 2432:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kohesi dan kelenturan aspal. Pada pengujian ini dilakukan pada suhu 25°C dengan meletakkan aspal pada dua cetakan berbeda kemudian aspal ditarik dengan kecepatan 50 mm/menit, lalu diukur jarak terpanjang aspal sebelum aspal putus maka kita dapat melakukan pengukuran nilai daktilitasnya.

c. Pengujian penetrasi mengacu ada SNI 2456:2011

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan bitumen dengan menggunakan jarum berukuran 0,1 mm, beban, dan waktu tertentu pada suhu tertentu.

d. Pengujian kelarutan pada *trichlor ethylen (TCE)* mengacu pada AASHTO T44-14.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kelarutan aspal dengan menggunakan larutan *TCE* sehingga dapat diketahui nilai kemurnian aspal tersebut.

e. Pengujian titik nyala dan bakar mengacu pada SNI 2433:2011

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui suhu dari aspal ketika terjadi nyala singkat diatas permukaan aspal (titik nyala) dan aspal terbakar sekitar 5 detik pada suatu titik (titik bakar).

f. Pengujian titik lembek mengacu pada SNI 2434:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui titik lembek aspal yang nilainya berkisar di antara 30°C sampai 200°C.

3. Pengujian *Filler*

Filler adalah bahan berbutir halus yang mempunyai fungsi sebagai pengisi pada pembuatan campuran aspal, *filler* didefinisikan sebagai fraksi debu mineral lolos saringan No. 200 (0,074 mm). Pengujian *filler* harus memenuhi persyaratan SNI 03-6723-2002.

4.4.2 Persiapan Alat

Peralatan yang digunakan untuk menunjang proses penelitian ini disediakan dari Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Peralatan yang digunakan sebagai berikut.

1. Seperangkat alat pengujian agregat, seperti satu set analisa saringan, mesin *los angeles*, tabung *sand equivalent*, dan *vibrator*.
2. Seperangkat alat pengujian aspal seperti alat uji daktilitas, penetrasi, kelarutan aspal, titik nyala, titik bakar, dan titik lembek.
3. Cetakan benda uji (*mold*) dengan diameter 10 cm dengan tinggi 7,5 cm.
4. Alat pengujian *marshall*, sebagai berikut.
 - a. Cincin penguji ber kapasitas 2500 kg dengan ketelitian 12,5 kg.
 - b. Kepala penekan berbentuk lengkung (*breaking head*).
 - c. Arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm.
 - d. Arloji penunjuk *flow* dengan ketelitian 0,25 mm beserta perlengkapannya.
5. Alat penumbuk benda uji dengan berat 4,536 kg dan tinggi jatuhan beban 45,7 cm bernama *compactor*.
6. Alat untuk mengeluarkan benda uji dari cetakan bernama *ejector*.
7. Timbangan berkapasitas 2 kg dengan ketelitian 0,1 gr dan timbangan berkapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gr yang dilengkapi penggantung.
8. Bak perendam (*waterbath*) yang digunakan untuk merendam benda uji sebelum dilakukan pengujian dilengkapi pengatur suhu minimum 20°C.

9. Oven digunakan untuk memanaskan benda uji dengan pengatur suhu sampai $(200 \pm 3) ^\circ\text{C}$.
10. Alat uji *ITS* dan *TSR* yang meliputi sebagai berikut.
 - a. Alat ukur tekan dengan lebar 0,5 inchi.
 - b. Arloji stabilitas dan *flow* dengan ketelitian 0,25 mm.
 - c. Perlatan penunjang lain selama proses penelitian seperti kompor, *thermometer*, spatula, wajan, gelas ukur, nampan, bak plastik, kain lap, jangka sorong, dan lainnya.
11. Alat pengujian VCA_{DRC}
 - a. Timbangan berkapasitas > 5 kg dengan ketelitian 1 gr.
 - b. Silinder takaran dengan diameter 150 mm dengan tinggi 159 mm.
 - c. *Tamping rod* berdiameter 16 mm dengan panjang 600 mm.
 - d. Oven untuk memanaskan agregat serta *thermometer*.
 - e. Alat penunjang lainnya seperti sendok pengaduk, spatula, nampan, sarung tangan anti panas, dan lain-lain.
12. Alat pengujian *draindown*
 - a. Timbangan benda uji.
 - b. Oven untuk memanaskan benda uji.
 - c. Keranjang kawat berbentuk silinder berdiameter 108 mm dan 165 mm, ukuran lubang jaring-jaring kawat sebesar 3,65 mm (1/4 inchi).
 - d. Piring almunium kecil sebagai alas penampung lelehan *mastic* atau aspal.

4.4.3 Perencanaan Campuran

Perencanaan campuran benda uji bergradasi *Stone Matrix Asphalt* 25 mm didasarkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 sebagai berikut.

1. Menentukan komposisi agregat.
2. Menentukan variasi kadar aspal pada campuran dengan menggunakan perhitungan Pb.
3. Melakukan pembuatan benda uji dengan 2 x 50 tumbukan menggunakan alat pemadat *Marshall*.
4. Menentukan nilai KAO berdasarkan parameter berikut.
 - a. *VITM* dengan syarat minimum 3% dan maksimum 5%,

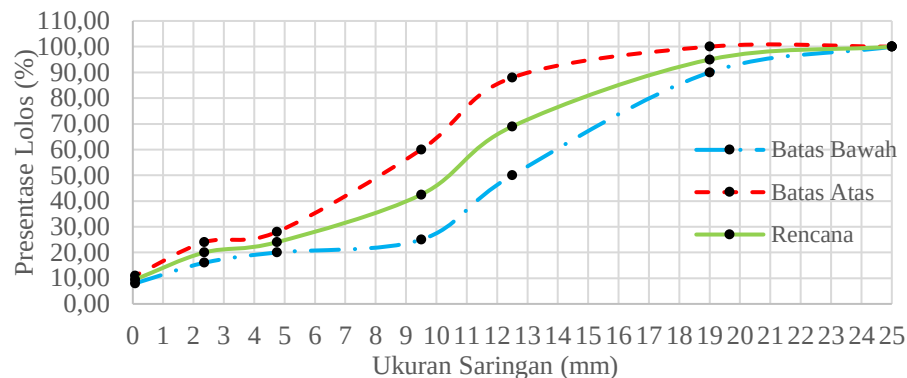
- b. VMA dengan syarat minimum 17%,
- c. Stabilitas *Marshall* campuran dengan syarat minimum 600 kg,
- d. *Flow* campuran dengan syarat minimum 2 mm dan maksimum 4,5 mm,
- e. *Draindown* dengan syarat maksimum 0,3%,
- f. *IRS* dengan syarat minimum 90%, dan
- g. VCA dengan syarat maksimum 1.

Gradasi agregat yang digunakan dari campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm

Ukuran Ayakan		Spesifikasi (%)		Jumlah Persen (%)	
Inchi	(mm)	Min	Maks	Lolos	Tertahan
1"	25	100	100	100	0
3/4"	19	90	100	95	5
1/2"	12.5	50	88	69	31
3/8"	9.5	25	60	42,5	57,5
No. 4	4.75	20	28	24	76
No. 8	2.36	16	24	20	80
No. 200	0.075	8	11	9,5	90,5
Pan		0	0	0	100

Berdasarkan Tabel 4.1 maka membentuk sebuah grafik gradasi campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Grafik Gradasi Campuran Stone Matrix Asphalt 25 mm

Penentuan kadar aspal optimum dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.1 berikut.

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%Filler) + K \quad (4.1)$$

Keterangan :

P_b = kadar aspal,

CA = persen agregat tertahan saringan No. 4,

FA = persen agregat lolos saringan No. 4 dan tertahan No. 200,

$Filler$ = persen agregat lolos saringan No. 200, dan

K = konstanta 1-2, pada penelitian ini di gunakan angka konstanta 1.

Berdasarkan hasil perhitungan awal (P_b) dengan nilai CA 76%, FA 14,5%, $Filler$ 9,5% maka $P_b = 0,035 (76) + 0,045 (14,5) + 0,18 (9,5) + 1 = 6,02 \%$ dibulatkan menjadi 6%. Sehingga pada pengujian untuk mencari kadar aspal optimum (KAO), kadar aspal yang digunakan adalah 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% terhadap berat total campuran seberat 1200 gr. Kadar serat selulosa pada masing-masing benda uji adalah sebesar 0.3% terhadap berat total campuran, yaitu sebanyak 3.6 gram. Untuk kadar substitusi yang dipakai pada *filler* yaitu menggunakan variasi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari berat total *filler*. Pada variasi kadar aspal untuk menentukan KAO memiliki kebutuhan agregat yang berbeda-beda pada setiap kadarnya, dapat dilihat pada Tabel 4.2 sampai Tabel 4.6

Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	57,00	57,00
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	296,40	353,40
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	302,10	655,50
# 4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	210,90	866,40
# 8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	45,60	912,00
# 200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	119,70	1031,70
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	108,30	1140,00

Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,70	56,70
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	294,84	351,54
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	300,51	652,05
# 4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	209,79	861,84
# 8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	45,36	907,20
# 200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	119,07	1026,27
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	107,73	1134,00

Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	95,00	95,00	5,00	56,40	56,40
1/2	12,5	50,00	69,00	69,00	26,00	293,28	349,68
3/8	9,5	25,00	42,50	42,50	26,50	298,92	648,60
# 4	4,75	20,00	24,00	24,00	18,50	208,68	857,28
# 8	2,36	16,00	20,00	20,00	4,00	45,12	902,40
# 200	0,075	8,00	9,50	9,50	10,50	118,44	1020,84
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	107,16	1128,00

Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,10	56,10
1/2	12.5	50,00	88,00	69,00	26,00	291,72	347,82
3/8	9.5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,33	645,15
# 4	4.75	20,00	28,00	24,00	18,50	207,57	852,72
# 8	2.36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,88	897,60
# 200	0.075	8,00	11,00	9,50	10,50	117,81	1015,41
Pan		0.00	0,00	0,00	0,00	9,50	1122,00

Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 7%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	55,80	55,80
1/2	12.5	50,00	88,00	69,00	26,00	290,16	345,96
3/8	9.5	25,00	60,00	42,50	26,50	295,74	641,70
# 4	4.75	20,00	28,00	24,00	18,50	206,46	848,16
# 8	2.36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,64	892,80
# 200	0.075	8,00	11,00	9,50	10,50	117,18	1009,98
Pan		0.00	0,00	0,00	9,50	106,02	1116,00

Jumlah benda uji yang digunakan untuk memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO

Kadar Aspal (%)	Pengujian		
	<i>Marshall</i>	<i>IRS</i>	<i>Draindown</i>
5	3	3	3
5,5	3	3	3
6	3	3	3
6,5	3	3	3
7	3	3	3
Jumlah Benda Uji	15	15	15
Total Keseluruhan	45		

Setelah didapatkan nilai KAO maka dilakukan pengujian untuk setiap nilai yang didapatkan. Jumlah benda uji untuk setiap pengujian KAO dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.8 Jumlah Benda Uji Untuk Setiap Pengujian KAO

Pengujian	Kadar <i>Filler</i> Pasir Besi (%)				
	0	25	50	75	100
<i>Marshall</i>	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3	3
<i>Contabro</i>	3	3	3	3	3
<i>Draindown</i>	3	3	3	3	3
Jumlah Benda Uji	21	21	21	21	21
Total Keseluruhan	90				

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Tabel 4.3, maka dalam penelitian ini benda uji yang digunakan yaitu 135 buah.

4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji

Dalam pembuatan campuran untuk benda uji dilakukan setelah melakukan tahapan perencanaan campuran dengan melakukan penyaringan agregat untuk memisahkan distribusi butir agregat sesuai dengan nomor saringan yang digunakan. Dilakukan penimbangan terhadap agregat yang tertahan di setiap nomor saringan. Langkah-langkah pembuatan campuran benda uji adalah sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Memanaskan aspal pada suhu tertentu, pada penelitian ini menggunakan aspal AC 60/70 yang dipanaskan mencapai suhu 160°C.
3. Memanaskan agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan serat selulosa sampai suhu 170°C, kemudian mencampurkan kadar aspal sesuai dengan persentase yang telah ditetapkan dan mengaduk sampai homogen.
4. Membersihkan cetakan benda uji dan mengolesi bagian dalam cetakan dengan menggunakan oli.

5. Meletakkan kertas yang telah dicetak sesuai dengan ukuran cetakan pada bagian bawah. Kemudian memasukkan campuran benda uji yang telah tercampur merata sebanyak $\frac{1}{3}$ bagian dari volume cetakan dan ditusuk-tusuk menggunakan spatula sebanyak 25 kali. Dengan cara yang sama, benda uji dimasukkan sampai cetakan penuh kemudian meletakkan kertas di bagian atas.
6. Meletakkan cetakan yang telah berisi benda uji di atas mesin pemadat. Kemudian menyeting mesin pemadat sebanyak 50 kali tumbukan di setiap sisi.
7. Setelah selesai pemadatan, benda uji dikeluarkan dari mesin pemadat dan didiamkan agar tidak terlalu panas.
8. Mengeluarkan benda uji dari cetakan menggunakan *ejector hydarulic pump*, kemudian mendiamkan benda uji tersebut dan mengambil kertas pada kedua sisi.

4.4.5 Pengujian *Marshall*

Marshall merupakan pengujian yang bertujuan untuk memperoleh nilai stabilitas, *flow*, *MQ*, *density*, *VITM*, *VMA*, dan *VFWA* dari suatu campuran perkerasan. Pengujian ini dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan benda uji yang akan digunakan.
2. Membersihkan benda uji dari kotoran yang masih menempel dari proses pembuatan sampel.
3. Mengukur tinggi benda uji pada tiga sisi dengan menggunakan kaliper kemudian menimbang benda uji dalam keadaan kering udara.
4. Merendam benda uji di dalam air pada suhu ruang selama 20 sampai 24 jam untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat hasilnya.
5. Mengelap benda uji yang telah ditimbang dalam air dengan menggunakan kain lap sampai mencapai kondisi SSD, kemudian menimbang benda uji sehingga diperoleh berat dalam keadaan SSD.
6. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit.
7. Memeriksa mesin *marshall* beserta dial pelengkapanya dan menyiapkan *breaking head* yang telah diolesi dengan oli.

8. Mengambil benda uji dari *waterbath* dan meletakkannya ke dalam *breaking head*, kemudian memasang dial *flow* dan menaikkan *breaking head* sampai benda uji menyentuh cincin penguji.
9. Mengatur jarum pada dial stabilitas dan *flow* pada posisi angka nol.
10. Menghidupkan mesin dan mengamati pembebanan sampai dial stabilitas mencapai angka maksimum.
11. Mencatat hasil pembacaan dari dial stabilitas dan dial *flow*.

4.4.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

Langkah-langkah pengujian *ITS* dapat dilakukan dengan cara berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *marshall*.
3. Meletakkan benda uji pada mesin *ITS*.
4. Menyalakan mesin uji dan mengamati pembacaan dial dan mencatat hasilnya.

4.4.7 Pengujian *Tensile Strength Rasio (TSR)*

Langkah-langkah pengujian *TSR* berpedoman pada SNI 8129:2015 dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan.
2. Membuat benda uji sesuai dengan pean menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *marshall*.
3. Merendam benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam, kemudian mendinginkan benda uji pada suhu ruang selama 24 jam.
4. Meletakkan benda uji mesin *TSR*.
5. Menyalakan mesin uji dan mengamati pembacaan dial dan mencatat hasilnya.

4.4.8 Pengujian *Indeks of Retained Strength (IRS)*

Pengujian *IRS* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Membersihkan benda uji dari kotoran yang masih menempel dari proses pembuatan sampel.
2. Mengukur tinggi benda uji pada tiga sisi dengan menggunakan kaliper kemudian menimbang benda uji dalam keadaan kering udara.

3. Merendam benda uji di dalam air pada suhu ruang selama 20 sampai 24 jam untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat hasilnya.
4. Mengelap benda uji yang telah ditimbang dalam air dengan menggunakan kain lap sampai mencapai kondisi SSD, kemudian menimbang benda uji sehingga diperoleh berat dalam keadaan SSD.
5. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam.
6. Memeriksa mesin *marshall test* beserta dial pelengkapanya dan menyiapkan *breaking head* yang telah diolesi dengan oli.
7. Mengambil benda uji dari *waterbath* dan meletakkannya ke dalam *breaking head*, kemudian memasang dial *flow* dan menaikkan *breaking head* sampai benda uji menyentuh cincin penguji.
8. Mengatur jarum pada dial stabilitas dan *flow* pada posisi angka nol.
- 12 Menghidupkan mesin dan mengamati pembebanan sampai dial stabilitas mencapai angka maksimum.
- 13 Mencatat hasil pembacaan dari dial stabilitas dan dial *flow*.

4.4.9 Pengujian *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition* (VCA_{DRC})

Pengujian VCA_{DRC} sesuai dengan ketentuan AASHTO 19M/T 19-14 sebagai berikut.

1. Benda uji campuran fraksi agregat kasar yang telah dipanaskan (kering), dituang ke dalam silinder takaran hingga mencapai 1/3 tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusuk-nusuk campuran tersebut menggunakan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata di seluruh permukaan lapis pertama tersebut. Penusukan dengan *tamping-rod* agar jangan sampai mengenai dasar silinder takaran.
2. Lapisan kedua dibentuk dengan menuangkan benda uji campuran fraksi agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) kedalam silinder takaran hingga mencapai 2/3 tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusuk-nusuk campuran tersebut dengan menggunakan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata diseluruh permukaan lapis pertama tersebut. Pemadatan dengan *tamping-rod* ini agar jangan sampai mengenai permukaan lapisan pertama.

3. Lapisan ketiga dibentuk dengan menuangkan benda uji campuran fraksi agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) kedalam silinder takaran hingga sedikit melebihi tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusuk-nusuk campuran tersebut dengan menggunakan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata diseluruh permukaan lapis pertama tersebut. Pemadatan dengan *tamping-rod* ini agar jangan sampai mengenai permukaan lapisan kedua.
4. Dilakukan perataan campuran fraksi agregat kasar yang sedikit melebihi tinggi wadah menggunakan *tamping-rod* atau mistar perata, hingga rata dengan tepian permukaan silinder takaran.
5. Benda uji bersama dengan wadah kemudian ditimbang dan dilakukan perhitungan untuk mengetahui VCA_{DRC} .
Benda uji pada VCA_{DRC} dibuat sama dengan jumlah benda uji pada VCA_{MIX} .

4.4.10 Pengujian *Draindown*

Pengujian *draindown* sesuai dengan ketentuan *AASHTO* T 305-14 sebagai berikut.

1. Persiapkan 2 unit oven, oven pertama diatur hingga mencapai kisaran suhu sesuai temperatur produksi dan oven kedua diatur hingga mencapai kisaran suhu 15°C lebih tinggi dari temperatur produksi masing-masing variasi benda uji dari hasil uji viskositas.
2. Masing-masing keranjang kawat dan alas aluminium ditimbang.
3. Campuran aspal dalam kondisi *loose* dituang kedalam keranjang kawat dengan piring aluminium sebagai alas lalu dilakukan penimbangan.
4. Benda uji tersebut ditempatkan dalam oven. Sebelum ditempatkan dalam oven, terlebih dahulu dilakukan pengukuran suhu benda uji menggunakan *thermometer*.
5. Bahan uji kemudian disimpan dalam oven-oven selama 60 ± 5 menit, namun jika suhu benda uji saat akan dimasukkan ke dalam oven sudah menurun menjadi lebih rendah 25°C dibawah temperatur pengujian, maka waktu penyimpanan benda uji dalam oven-oven selama 70 ± 5 menit.

6. Setelah waktu pemanasan dalam ven terpenuhi, dilakukan penimbangan alas piring aluminium yang telah menampung lelehan *mastic* atau aspal dengan ketelitian 0,1 gr.

4.4.11 Pengujian *Cantabro loss*

Pengujian *cantabro loss* dapat dilakukan sebagai berikut.

1. Mempersiapkan bahan.
2. Menimbang benda uji untuk mendapatkan berat sebelum diabrasi (Mo).
3. Selanjutnya meletakkan benda uji kedalam mesin *los angeles* tanpa bola baja.
4. Memutar mesin dengan kecepatan 30-33 rpm sebanyak 300 putaran.
5. Setelah selesai pemutaran, mengeluarkan benda uji dari mesin kemudian ditimbang lagi untuk mendapatkan berat benda uji setelah dilakukan pengujian abrasi (Mi).

4.5 Analisis Data

Setelah dilakukan berbagai macam pengujian, maka dilakukan analisis data untuk mendapatkan parameter hasil pengujian secara lengkap.

4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall*

Parameter hasil pengujian *marshall* diperoleh data sebagai berikut.

1. Berat benda uji kering udara (gram)
2. Berat benda uji dalam air (gram)
3. Berat benda uji SSD (gram)
4. Tebal benda uji (mm)
5. Pembacaan dial stabilitas (kg)
6. Pembacaan dial *flow* (mm)

Karakteristik *Marshall* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

1. Berat jenis aspal

Berat jenis aspal dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.2 berikut.

$$B_j \text{ Aspal} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (4.2)$$

keterangan :

A = berat piknometer dengan penutup (gr),

- B = berat piknometer berisi air (gr),
 C = berat piknometer berisi aspal, dan
 D = berat piknometer berisi air dan aspal.

2. Berat jenis agregat

Berat jenis agregat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.3 berikut.

$$B_j \text{ Aspal} = \frac{(A \times F1) + (B \times F2)}{100} \quad (4.3)$$

keterangan :

- A = persentase agregat kasar (%),
 B = persentase agregat halus (%),
 F1 = berat jenis agregat kasar, dan
 F2 = berat jenis agregat halus.

3. Nilai stabilitas dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.1.
4. Nilai *flow* diperoleh dari hasil pembacaan dial *flow*.
5. Nilai *MQ* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.2.
6. Nilai *VITM* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.3 dan 3.4.
7. Nilai *VFWA* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.5 sampai 3.9.
8. Nilai *VMA* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.10 dan 3.11.
9. Nilai *density* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.12 dan 3.13.

4.5.2 Analisis Pengujian *IRS*

Nilai pengujian *IRS* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.14.

4.5.3 Analisis Pengujian *ITS*

Nilai pengujian *ITS* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.15.

4.5.4 Analisis Pengujian *TSR*

Nilai pengujian *TSR* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.16.

4.5.5 Analisis Pengujian *Draindown*

Nilai pengujian *draindown* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.17.

4.5.6 Analisis Pengujian *Contabro Loss*

Nilai pengujian *contabro loss* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.18.

4.5.7 Analisis Nilai IDP

Nilai nilai IDP dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.19.

4.5.8 Analisis nilai IDK

Nilai nilai IDK dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.20 sampai 3.23.

4.5.9 Analisis Pengujian VCA

Nilai pengujian VCA dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.24 sampai 3.25.

4.5.10 Analisis Statistik ANOVA Satu Arah

Analisis statistik bertujuan untuk mengetahui perubahan yang terjadi akibat adanya pengaruh substitusi *filler* serbuk besi pada campuran *Stone Matrix Asphal* 25 mm. Data yang akan dianalisis dengan ANOVA antara lain karakteristik *Marshall*, *VCA*, *Draindown*, *IRS*, IDP, IDK, *ITS*, *TSR*, *cantabro loss*. Secara umum analisis statistik ANOVA adalah sebagai berikut.

1. Merumuskan hipotesis (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) untuk melihat pengaruh masing-masing faktor variabel. Rumusan hipotesis dapat dilihat pada Persamaan 4.4 dan 4.5 berikut ini.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (4.4)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 = \dots \neq \mu_k \quad (4.5)$$

2. Menentukan nilai α atau signifikan umumnya digunakan 5% atau 0,05.

Jika nilai signifikan atau *P-Value* $> 0,05$; maka H_0 ditolak dan H_1 diterima.

Jika nilai signifikan atau *P-Value* $< 0,05$; maka H_0 diterima dan H_1 ditolak.

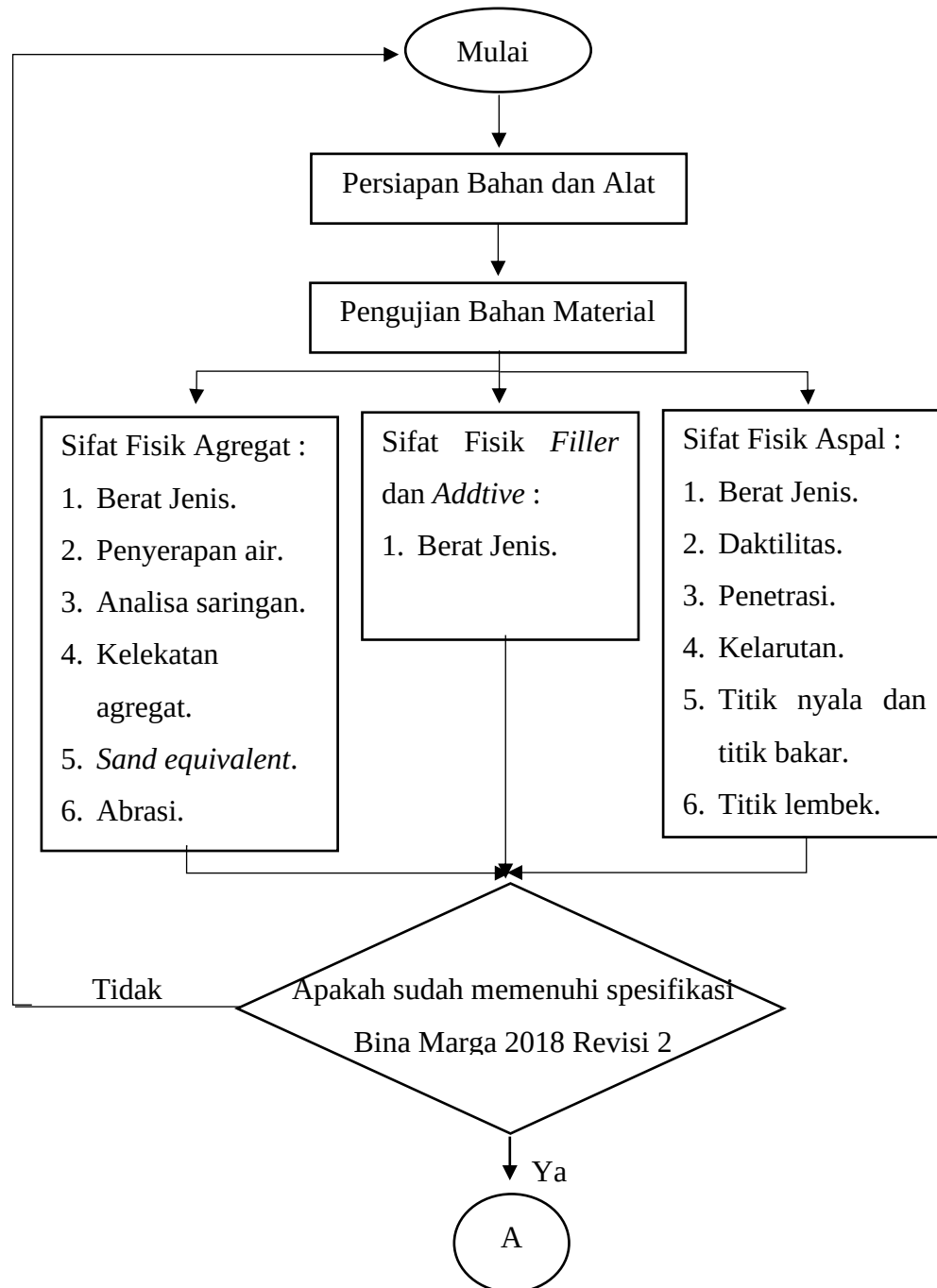
3. Perumusan keputusan H_0 dan H_1

H_0 : Tidak ada perbedaan signifikan

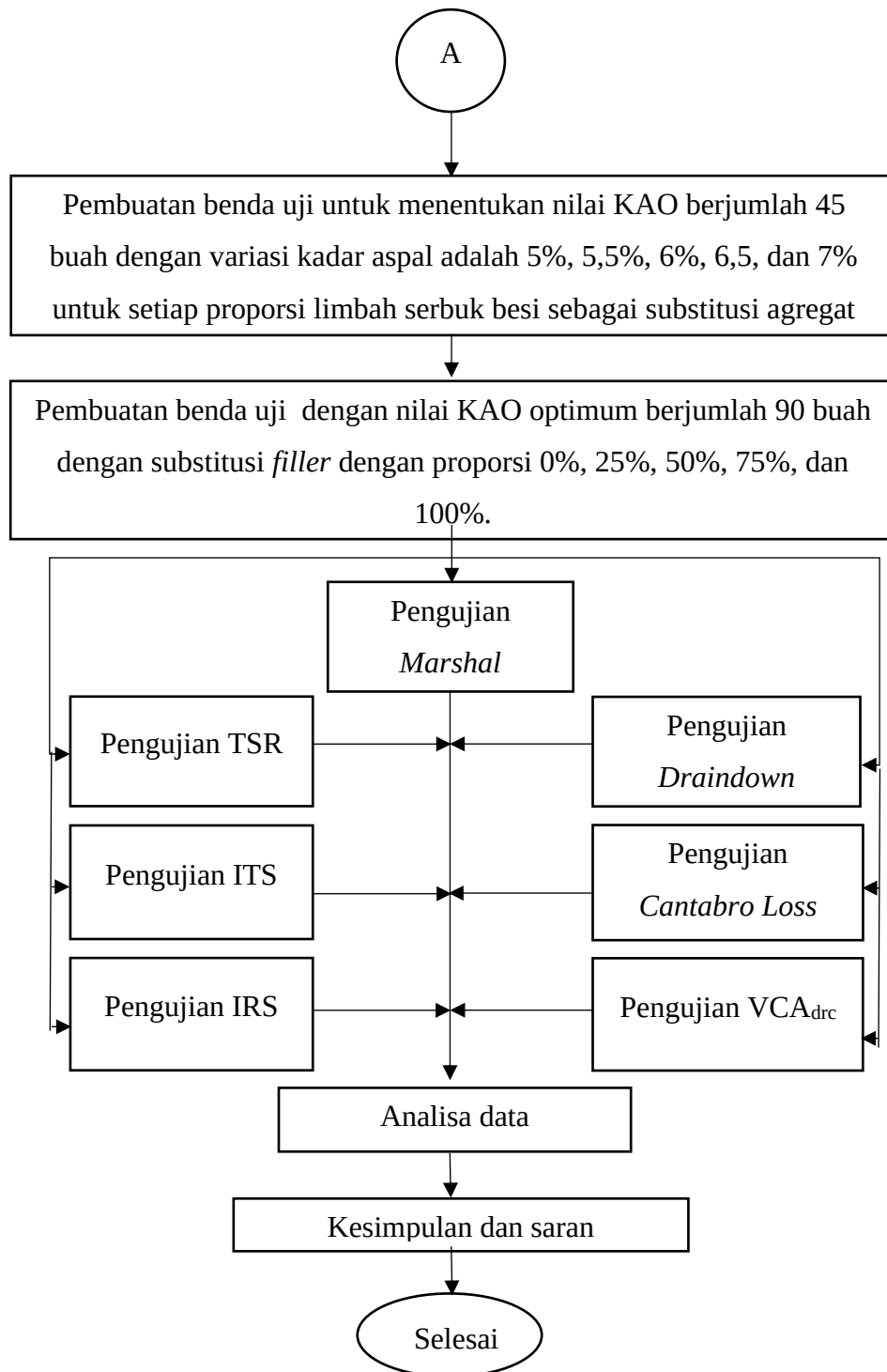
H_1 : Ada perbedaan signifikan

4.6 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir Penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian Bahan Dan Campuran

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pada penelitian ini aspal yang digunakan adalah aspal aspal Pen 60/70. Pengujian karakteristik aspal dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pada pengujian tersebut diperoleh data – data yang telah memenuhi persyaratan spesifikasi, pengujian ini berpedoman pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Rekapitulasi hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat jenis	$\geq 1,0$	1,047	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60-70	65,50	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	165	Memenuhi
4	Titik lembek ($^{\circ}\text{C}$)	≥ 48	48	Memenuhi
5	Titik nyala ($^{\circ}\text{C}$)	≥ 232	270	Memenuhi
6	Titik bakar ($^{\circ}\text{C}$)	≥ 232	290	Memenuhi
7	Kelarutan pada TCE (%)	≥ 99	99,43	Memenuhi

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian karakteristik agregat terdiri dari beberapa pengujian diantaranya pengujian agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Pengujian tersebut dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pada pengujian tersebut diperoleh data– data yang telah memenuhi persyaratan spesifikasi, pengujian ini berpedoman pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Rekapitulasi hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.2 sampai Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	$\geq 2,5$	2,61
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 2	1,88
3	Kelekatan agregat terhadap aspal (%)	≥ 95	96,5
4	Keausan agregat dengan mesin <i>los angeles</i> (%)	≤ 40	12,9

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	$\geq 2,5$	2,55
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 2	1,49
3	<i>Sand equivalent</i> (%)	≥ 50	91,30

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler*

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis debu batu	$\geq 2,5$	2,541
1	Berat jenis serbuk besi	$\geq 2,5$	3,293

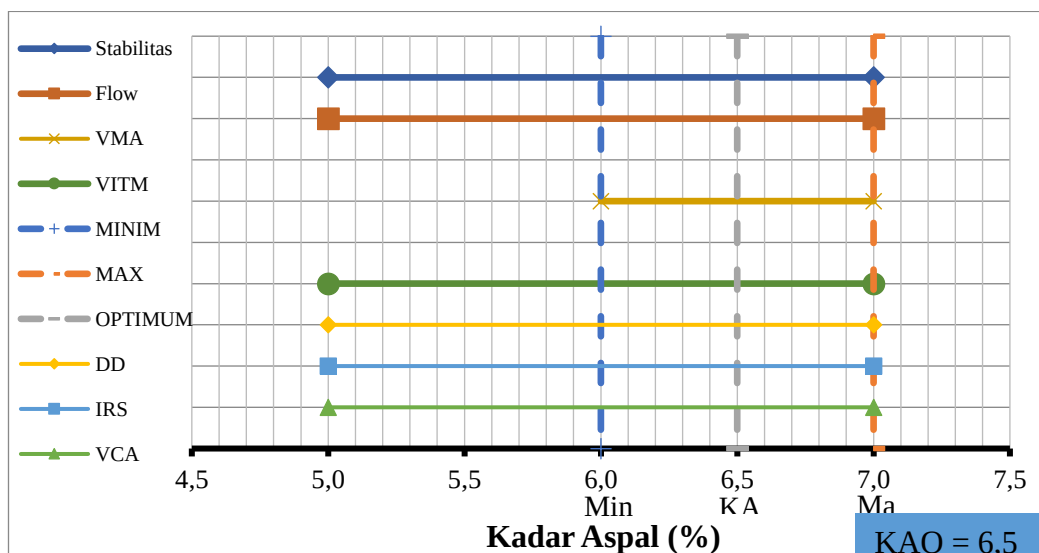
Pada Tabel 5.4 dapat dilihat bahwa hasil pengujian menunjukkan terjadi perbedaan berat jenis antara debu batu dan serbuk besi. Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Pengujian ini dilakukan di laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai KAO pada campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm yang menggunakan Pen 60/70. Didapatkan nilai-nilai *stability*, *flow*, *VMA*, *VITM*, *IRS*, *draindown*, dan *VCA*.

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Untuk Menentukan KAO

Pengujian	5	5,5	6	6,5	7	Spesifikasi
Stabilitas (kg)	833,76	880,78	933,49	951,85	903,20	> 600
Flow (mm)	2,12	2,28	2,93	3,20	3,32	2-4,5
VITM (%)	4,35	4,30	4,10	3,72	3,26	3-5
VMA (%)	15,39	16,37	17,20	17,88	18,48	> 17
Draindown (%)	0,06	0,08	0,10	0,11	0,13	<0,3
IRS (%)	90,23	90,68	91,71	93,76	95,44	>90
VCA	0,790	0,801	0,809	0,814	0,816	<1

Penentuan KAO berdasarkan perhitungan secara grafis, nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.

**Gambar 5. 1 Penentuan Kadar Aspal Optimum dengan Substitusi Filler Serbuk Besi**

Pada Gambar 5. 1, maka dapat dilihat bahwa Kadar Aspal Optimum yang digunakan untuk variasi substitusi *filler* adalah 6,5%. Pada penelitian ini menggunakan *filler* serbuk besi sebagai substitusi *filler* debu batu, yang dimana keduanya memiliki berat jenis yang berbeda. Setelah dilakukan pengujian diperoleh nilai berat jenis masing-masing yaitu untuk serbuk besi sebesar 3,293 gr/cm³ dan debu batu sebesar 2,643 gr/cm³. Maka untuk mendapatkan perbandingan berat

volume yang sama dilakukan pengolahan data. Rekapitulasi hasil untuk perbandingan masing-masing *filler* dapat dilihat pada Tabel 5. 6 sebagai berikut.

Tabel 5. 6 Berat Debu Batu dan Serbuk Besi

Kadar Variasi Substitusi <i>Filler</i> (%)	Berat Debu Batu (gr)	Berat Serbuk Besi (gr)	Kadar Aspal Optimum (%)
0	106,59	0,00	6,5
25	79,94	34,54	
50	53,30	69,08	
75	26,65	103,62	
100	0,00	138,16	

Berikut ini adalah limbah serbuk besi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5. 2 berikut.



Gambar 5. 2 Limbah Serbuk Besi

5.1.3 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm pada Kadar Aspal Optimum

Diperoleh data hasil pengujian campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm pada Kadar Aspal Optimum dengan substitusi serbuk besi sebagai *filler* pengganti

dengan pengujian *marshall*, *VCA*, *IRS*, *IDP*, *IDK*, *ITS*, *TSR*, dan *cantabro loss* dapat dilihat pada Tabel 5.7 sampai Tabel 5.18.

1. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Marshall*

Tabel 5. 7 Hasil Rekapitulasi Pengujian Marshall pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Agregat Halus (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
0	951,85	3,20	297,19	3,72	79,22	17,88	2,28
25	887,82	2,63	342,13	4,31	76,78	18,47	2,28
50	862,39	2,30	384,63	4,38	76,47	18,47	2,27
75	798,35	2,23	347,27	6,09	70,24	20,14	2,26
100	611,08	2,22	336,70	7,04	66,58	21,03	2,25
Spesifikasi	> 600	2-4,5	> 250	3-5	> 65	> 17	

2. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Void Coarse Aggregate* (VCA)

Tabel 5. 8 Hasil Rekapitulasi Pengujian VCA pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	VCA_{MIX}/VCA_{DRC}
0	0,814
25	0,824
50	0,828
75	0,829
100	0,871

3. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Draindown*

Tabel 5. 9 Hasil Rekapitulasi Pengujian *Draindown* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	<i>Draindown</i> (%)
0	0,115
25	0,097
50	0,086
75	0,069
100	0,057

4. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)*

Tabel 5. 10 Hasil Rekapitulasi Pengujian *IRS* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	IRS (%)
0	93,76
25	96,36
50	96,40
75	96,47
100	97,64

5. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian Indeks Durabilitas Pertama (IDP)

Tabel 5. 11 Hasil Rekapitulasi Pengujian IDP pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	IDP (%)
0	0,271
25	0,158
50	0,157
75	0,153
100	0,103

6. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian Indeks Durabilitas Kedua (IDK)

Tabel 5. 12 Hasil Rekapitulasi Pengujian IDK pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	IDK (%)
0	3,120
25	1,822
50	1,802
75	1,763
100	1,181

7. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Index Tensile Strength* (ITS)

Tabel 5. 13 Hasil Rekapitulasi Pengujian ITS pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	ITS (kPa)
0	783,813
25	753,340
50	743,910
75	671,149
100	551,036

8. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR)

Tabel 5. 14 Hasil Rekapitulasi Pengujian TSR pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	TSR (%)
0	98,805
25	99,885
50	99,960

Lanjutan Tabel 5. 15 Hasil Rekapitulasi Pengujian TSR pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi Filler Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	TSR (%)
75	99,626
100	99,445

9. Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Cantabro Loss*

Tabel 5. 16 Hasil Rekapitulasi Pengujian Cantabro Loss pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi Filler Serbuk Besi

Kadar Substitusi Serbuk Besi (%)	Kehilangan Berat (%)
0	18,41
25	12,52
50	10,92
75	10,66
100	9,90

Dari hasil pengujian diperoleh data karakteristik *marshall*, *VCA*, *draindown*, *IRS*, *IDP*, *IDK*, *ITS*, *TSR*, *cantabro loss* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm seperti diatas. Selanjutnya data dari hasil pengujian dianalisis menggunakan statistik *ANOVA* satu arah, pada Tabel 5.16 dan Tabel 5.17 berikut.

Tabel 5. 17 Rekapitulasi Data Uji Statistika ANOVA Satu Arah Untuk Pengaruh Filler Serbuk Besi Terhadap Karakteristik Marshall

Parameter	Nilai Signifikan	Keterangan	Hasil Analisis
Stabilitas	0,010	H1 diterima	Signifikan
<i>Flow</i>	0,089	H0 diterima	Tidak signifikan
<i>VITM</i>	0,031	H1 diterima	Signifikan
<i>VFWA</i>	0,043	H1 diterima	Signifikan
<i>VMA</i>	0,016	H1 diterima	Signifikan
<i>MQ</i>	0,838	H0 diterima	Tidak signifikan
<i>Density</i>	0,752	H0 diterima	Tidak Signifikan

Tabel 5. 18 Rekapitulasi Data Uji Statistika ANOVA Satu Arah Untuk Pengaruh Filler Serbuk Besi Terhadap *IRS*, *IDP*, *IDK*, *ITS*, *TSR*, *VCA*, *Cantabro*, dan *Draindown*

Parameter	Nilai Signifikan	Keterangan	Hasil Analisis
<i>IRS</i>	0,869	H0 diterima	Tidak signifikan
<i>IDP</i>	0,869	H0 diterima	Tidak signifikan
<i>IDK</i>	0,869	H0 diterima	Tidak Signifikan
<i>ITS</i>	0,040	H1 diterima	Signifikan
<i>TSR</i>	1,000	H0 diterima	Tidak signifikan
<i>VCA</i>	0,095	H0 diterima	Tidak signifikan
<i>Cantabro</i>	0,001	H1 diterima	Signifikan
<i>Draindown</i>	0,001	H1 diterima	Signifikan

5.2 Pembahasan

5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pembahasan untuk pengujian karakteristik aspal adalah sebagai berikut.

1. Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal perlu diperhatikan dalam merancang campuran antara agregat dan aspal. Hasil pengujian berat jenis menunjukkan nilai sebesar 1,047, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $> 1,00$.

2. Penetrasi Aspal

Pengujian penetrasi aspal bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal. Semakin keras aspal ditunjukkan oleh semakin kecilnya angka penetrasi aspal. Semakin keras aspal menunjukkan semakin lekatnya aspal dan semakin besar nilai kohesinya. Hasil pengujian penetrasi aspal Pertamina Pen 60/70 didapatkan nilai penetrasi sebesar 65,5 mm, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu 60-70 mm.

3. Daktilitas Aspal

Pengujian daktilitas bertujuan untuk mengetahui keliatan atau kohesi dalam aspal itu sendiri yang dapat mempengaruhi nilai fleksibilitas campuran. Hasil

pengujian daktilitis sebesar 165 cm, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu 100 cm.

4. Titik Nyala Aspal dan Titik Bakar Aspal

Pengujian titik nyala aspal bertujuan untuk mengetahui batas temperatur dimana aspal masih cukup aman untuk dipanaskan. Hasil pengujian ini diperoleh titik nyala pada aspal 270°C, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 232^{\circ}\text{C}$.

Nilai titik bakar aspal yaitu nilai yang menunjukkan batas temperatur ketika aspal mulai menimbulkan api yang terlihat menyala ± 5 detik pada permukaan aspal. Hasil pengujian ini diperoleh titik bakar sebesar 290 °C, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 232^{\circ}\text{C}$.

5. Titik Lembek Aspal

Pengujian titik lembek aspal bertujuan untuk mengetahui kepekaan aspal terhadap temperatur dimana aspal akan lembek apabila pada temperatur tinggi. Pada pengujian ini didapatkan nilai sebesar 48 °C, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 48^{\circ}\text{C}$.

6. Kelarutan dalam *Trychloroethylene* (TCE)

Pengujian kelarutan dalam *TCE* bertujuan untuk menentukan jumlah aspal yang larut dalam *TCE*. Jumlah yang terlarut menunjukkan kemurnian aspal. Semakin besar aspal yang terlarut menunjukkan kemurnian aspal yang semakin tinggi, artinya semakin kecil kandungan bahan mineral lainnya yang dapat mengganggu ikatan aspal dan batuan. Pada pengujian ini didapatkan hasil sebesar 99,43%, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 99\%$.

5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat kasar

Pembahasan untuk pengujian karakteristik agregat kasar adalah sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat Kasar

Berat jenis dan penyerapan adalah dua parameter yang saling berkaitan. Berat jenis tinggi menunjukkan porositas rendah, sebaliknya batuan dengan berat jenis yang kecil menunjukkan tingkat kekuatan yang rendah dan porositas tinggi.

Hasil dari pengujian agregat kasar sebesar 2,61, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 2,5$.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Kasar

Pengujian penyerapan agregat terhadap air bertujuan untuk mengetahui besarnya porositas dari agregat, semakin besar nilai penyerapannya mengidentifikasikan bahwa agregat semakin porous. Hasil dari pengujian sebesar 1,88%, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\leq 2\%$.

3. Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal bertujuan untuk mengetahui besarnya kemampuan agregat untuk dilekati aspal. Hasil dari pengujian agregat kasar sebesar 96,5%, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 95\%$.

4. Keausan Agregat kasar dengan Mesin *Los Angeles*

Pengujian keausan dengan mesin *los angeles* bertujuan untuk menentukan ketahanan agregat terhadap keausan. Agregat yang digunakan dalam campuran merupakan komponen yang berfungsi untuk mendukung beban lalu lintas yang bekerja diatas perkerasan sehingga diperlukan agregat yang tahan terhadap keausan oleh gesekan roda kendaraan. Hasil dari pengujian sebesar sebesar 12,9 %, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\leq 40\%$.

5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Pembahasan untuk pengujian karakteristik agregat halus adalah sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat Halus

Berat jenis adalah perbandingan antara berat satuan volume dari suatu material terhadap berat air terhadap volume yang sama pada temperatur tertentu. Hasil pengujian berat jenis agregat halus Clereng, Kulon Progo adalah sebesar 2,55, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 2,5$.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Halus

Penyerapan agregat terhadap air adalah kemampuan suatu bahan untuk menyerap air, rongga atau pori pada agregat. Agregat yang memiliki rongga/pori yang besar akan lebih banyak membutuhkan aspal karena nilai penyerapannya semakin besar. Hasil pengujian penyerapan agregat halus Clereng, Kulon Progo terhadap air adalah sebesar 1,49 %, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\leq 2\%$.

3. *Sand Equivalent*

Pengujian sand equivalent menunjukkan tingkat kebersihan agregat terhadap debu, lumpur atau kotoran lainnya. Hasil pengujian sand equivalent agregat halus Clereng adalah sebesar 91,30 %, hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu $\geq 50\%$. Hal ini menunjukkan bahwa agregat halus Clereng cukup bersih dan terbebas dari kandungan debu, lumpur, atau kotoran lainnya yang dapat mengganggu kelekatan aspal terhadap agregat.

5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*)

Pengujian karakteristik bahan pengisi (*filler*) bertujuan untuk mengetahui karakteristik bahan pengisi (*filler*). Berikut pembahasan dari pengujian bahan pengisi.

1. Pengujian Berat Jenis Debu Batu

Berat jenis adalah perbandingan antara berat satuan volume dari suatu material terhadap berat air terhadap volume yang sama pada temperatur tertentu. Hasil pengujian berat jenis *filler* debu batu adalah sebesar 2,541.

2. Pengujian Berat Jenis Serbuk Besi

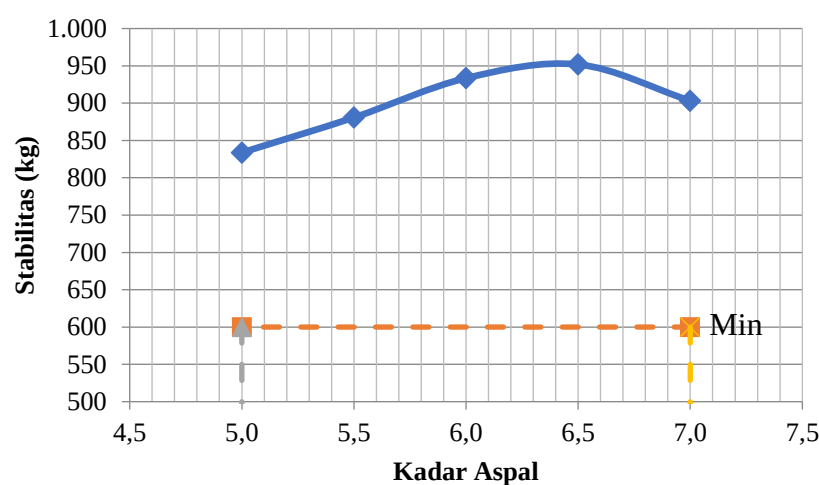
Berat jenis adalah perbandingan antara berat satuan volume dari suatu material terhadap berat air terhadap volume yang sama pada temperatur tertentu. Hasil pengujian berat jenis *filler* serbuk besi adalah sebesar 3,293.

Dalam menentukan berat volume perlu diketahui berat jenis pada masing-masing *filler*. Hal ini guna mengetahui perbandingan volume antar *filler* sehingga dapat melingkupi volume yang sama karena berat jenis serbuk besi sebagai *filler* pengganti lebih kecil dari berat jenis *filler* debu batu.

5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

1. Analisis Pengaruh Nilai Stabilitas untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, dan *bleeding*. Nilai stabilitas ditunjukkan pada Gambar 5.3 sebagai berikut.

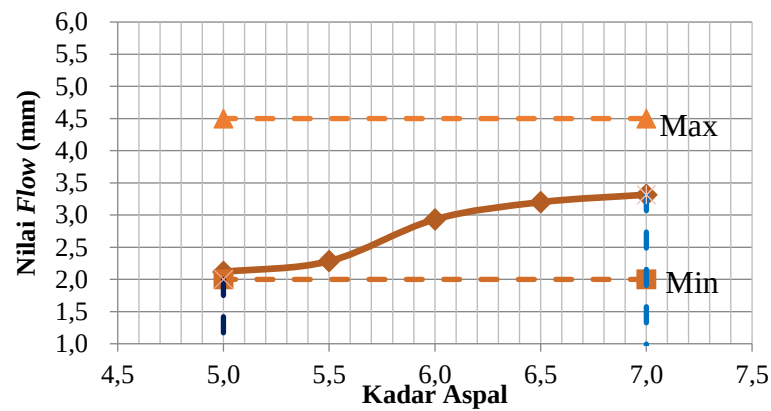


Gambar 5. 3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas

Pada Gambar 5.3 dapat dilihat bahwa nilai stabilitas campuran mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal. Akan tetapi, setelah mencapai nilai stabilitas maksimum maka nilai stabilitas mengalami penurunan. Sukirman (1992) bahwa Meningkatnya stabilitas bersamaan dengan meningkatnya kadar aspal, sampai batas optimum dan turun setelah melampaui batas optimum. Hal ini terjadi akibat semakin banyaknya kadar aspal yang menyebabkan selimut aspal menjadi tebal sehingga mengakibatkan gesekan antar butiran berkurang dan aspal dari pengikat berubah menjadi pelicin antar agregat.

2. Analisis Pengaruh Nilai *flow* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Beban pada saat terjadi keruntuhan dibaca pada arloji pengukur dari *proving* ring, kelelehan yang terjadi pada saat itu merupakan nilai kelelehan (*flow*) yang dapat dibaca pada *flowmeternya*. *Flowmeter* mengukur besarnya kelelehan yang terjadi akibat beban. Nilai *flow* ditunjukkan pada Gambar 5.4 sebagai berikut.

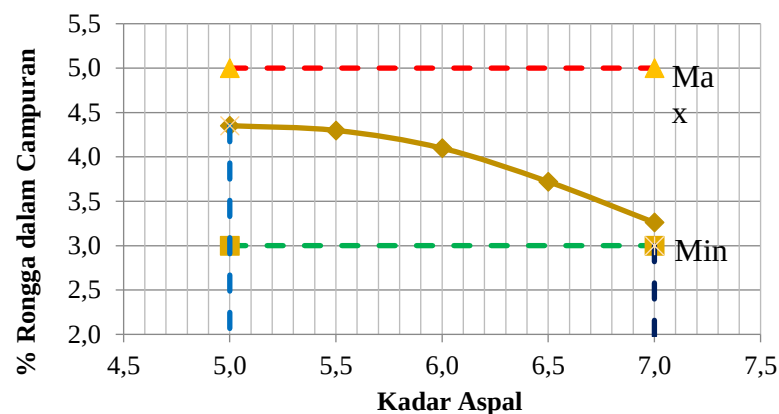


Gambar 5. 4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow*

Pada Gambar 5.4 dapat dilihat bahwa nilai *flow* atau kelelahan mengalami peningkatan seiring meningkatnya kadar aspal, dikarenakan selimut aspal bertambah tebal. Sukirman (1992) bahwa semakin bertambahnya kadar aspal akan meningkatkan nilai *flow* pada campuran. Nilai *flow* yang meningkat menyebabkan campuran semakin bersifat plastis, sehingga campuran akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk saat terkena beban.

3. Analisis Pengaruh Nilai *VITM* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

VITM adalah persentase antara rongga udara dengan volume total campuran setelah dipadatkan. Nilai *VITM* ditunjukkan pada Gambar 5.5 sebagai berikut.

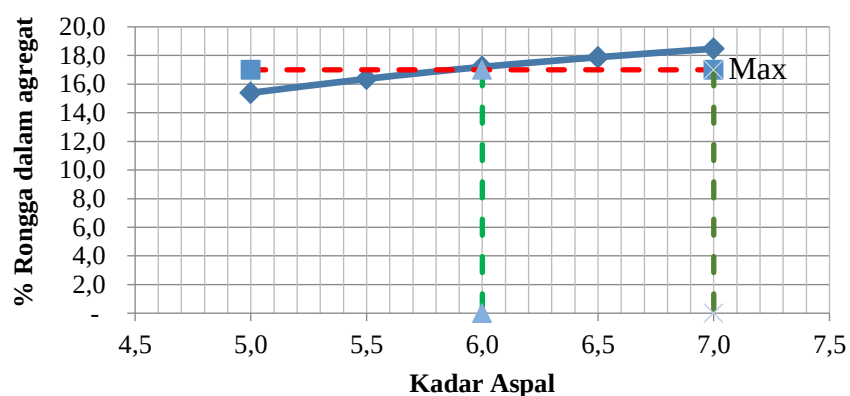


Gambar 5. 5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VITM*

Pada Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa nilai *VITM* mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar aspal, dikarenakan aspal mengisi rongga pada campuran. Sukirman (1992) bahwa dengan bertambahnya kadar aspal akan menurunkan nilai *VITM* pada campuran. Hal ini menyebabkan campuran menjadi kedap air dan udara tidak masuk ke dalam campuran yang menyebabkan oksidasi dan aspal menjadi rapuh.

4. Analisis Pengaruh Nilai *VMA* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

VMA adalah banyaknya pori di antara butir-butir agregat di dalam beton aspal padat yang dinyatakan dalam persentase. Nilai *VMA* ditunjukkan pada Gambar 5.6 sebagai berikut.

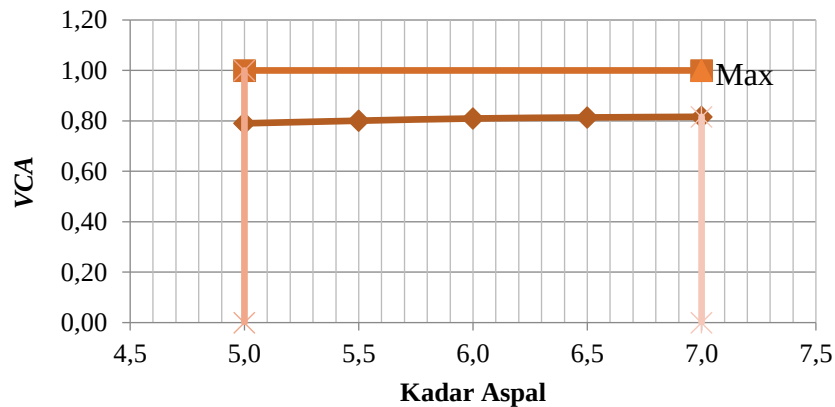


Gambar 5. 6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VMA*

Pada Gambar 5.6 dapat dilihat bahwa nilai *VMA* mengalami peningkatan seiring meningkatnya kadar aspal, dikarenakan kadar aspal yang semakin banyak mengisi rongga-rongga dan menyelimuti agregat. Sukirman (1992) bahwa dengan bertambahnya kadar aspal akan menaikkan nilai *VMA* pada campuran. Hal ini disebabkan semakin tebal aspal yang menyelimuti agregat sehingga jarak rongga antara agregat semakin besar. *VMA* dan kadar aspal yang tinggi dapat mengakibatkan lapis perkerasan menjadi lentur.

5. Analisis Pengaruh Nilai *VCA* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

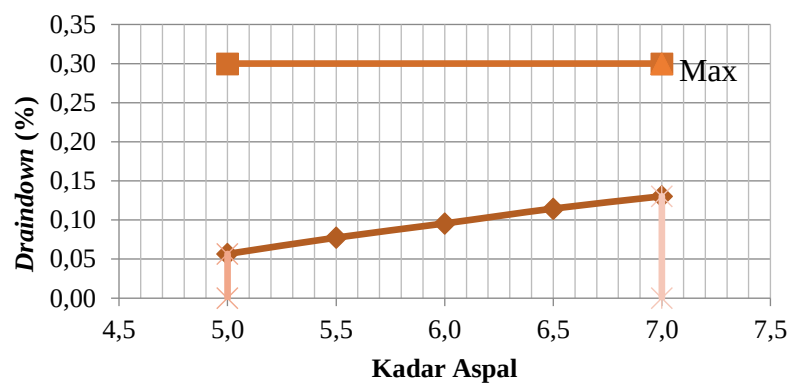
Metode yang bertujuan untuk menentukan terjadinya kontak antar batuan adalah metode *VCA* (*Voids in Coarse Aggregate*). Nilai *VCA* ditunjukkan pada Gambar 5.7 sebagai berikut.



Gambar 5. 7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VCA

Pada Gambar 5.7 dapat dilihat bahwa nilai *VCA* mengalami peningkatan seiring meningkatnya kadar aspal, dikarenakan aspal semakin menyelimuti agregat dan menyebabkan rongga antar agregat semakin besar.

6. Analisis Pengaruh Nilai *Draindown* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum
Draindown dilakukan untuk mengetahui pengaliran aspal pada campuran. Nilai *draindown* ditunjukkan pada Gambar 5.8 sebagai berikut.

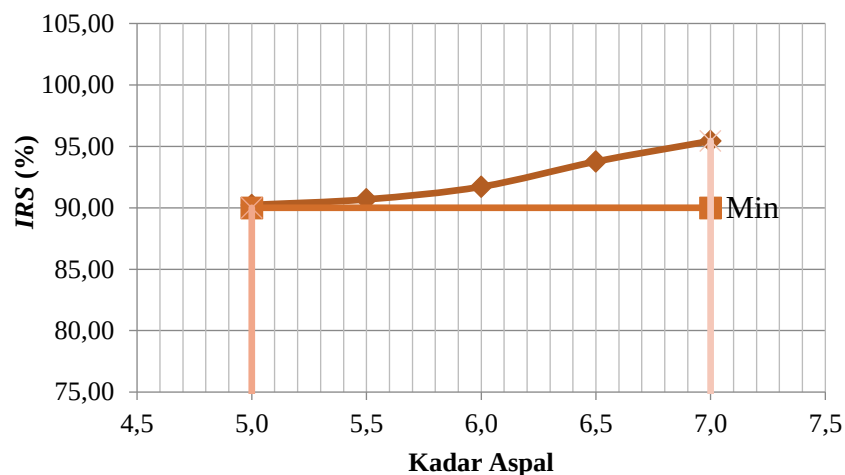


Gambar 5. 8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Draindown

Pada Gambar 5.8 dapat dilihat bahwa nilai *draindown* mengalami peningkatan seiring meningkatnya kadar aspal, dikarenakan semakin meningkatnya kadar aspal maka terjadi pengaliran aspal pada campuran.

7. Analisis Pengaruh Nilai *IRS* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Nilai *IRS* merupakan suatu metode untuk mengevaluasi pengaruh air terhadap suatu campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui durabilitas suatu campuran dalam menerima beban. Nilai *IRS* ditunjukkan pada Gambar 5.9 sebagai berikut.



Gambar 5. 9 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *IRS*

Pada Gambar 5.9 dapat dilihat bahwa nilai *IRS* mengalami peningkatan seiring meningkatnya kadar aspal, dikarenakan semakin bertambah kadar aspal campuran lebih rapat dan kedapatan air semakin baik sehingga memiliki durabilitas yang baik.

5.2.6 Karakteristik *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum Campuran dengan Substitusi *Filler* Serbuk Besi

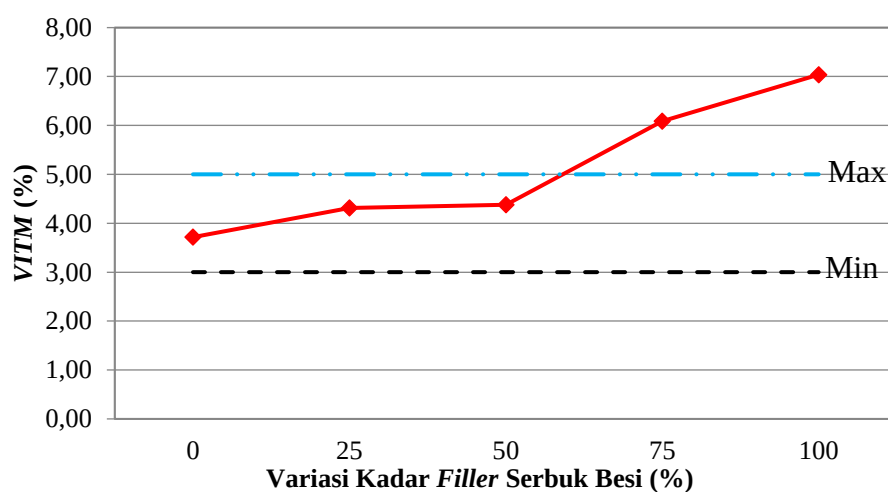
Berdasarkan hasil pengujian *marshall* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm dengan substitusi serbuk besi. Berdasarkan pengujian berat jenis, nilai berat

jenis serbuk besi lebih besar daripada nilai berat jenis debu batu Clereng, maka hal ini akan berpengaruh terhadap campuran aspal.

Berikut adalah hasil pengujian pengaruh penggunaan serbuk besi sebagai substitusi *filler* dengan nilai KAO sebesar 6,5% sebagai berikut.

1. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi Agregat Halus Terhadap Nilai *Void in The Mix* (VITM)

Grafik hasil nilai *VITM* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5. 10 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VITM

Pada Gambar 5.10 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami peningkatan nilai *VITM*. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap nilai *VITM*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai *VITM* pada campuran. Hal ini disebabkan *filler* serbuk besi yang memiliki tekstur lebih kasar daripada *filler* abu batu yang membuat aspal menjadi tidak plastis dan mengurangi kemampuan aspal dalam mengisi rongga dalam campuran, maka membuat campuran memiliki rongga udara yang besar. Pada campuran yang memiliki rongga udara yang besar maka akan menyebabkan campuran menjadi tidak kedap terhadap air dan udara

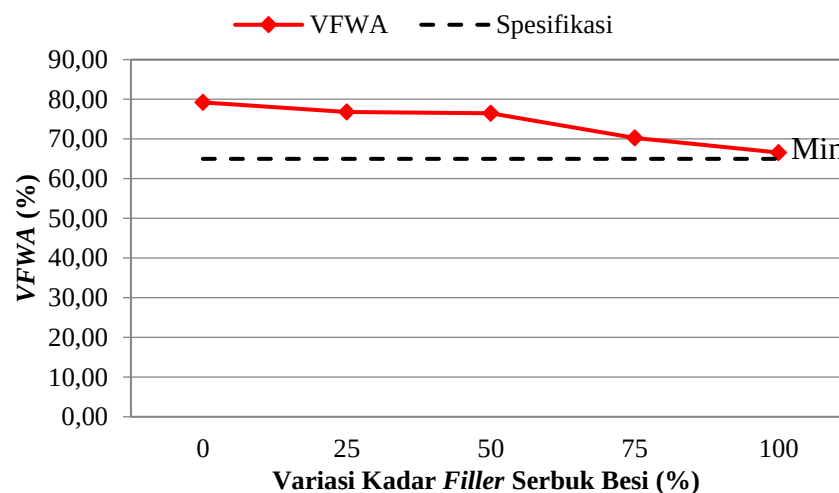
sehingga menyebabkan campuran menjadi lebih mudah teroksidasi dan deformasi.

Penelitian ini sejalan dengan Utomo (2020) pada penelitiannya yang menggunakan limbah serbuk besi sebagai material pengisi (*filler*) menunjukkan hasil nilai *VITM* yang cukup besar, hal tersebut disebabkan *filler* limbah serbuk besi kurang maksimal mengisi seluruh rongga maka menyebabkan rongga antar agregat yang besar.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VITM* untuk campuran *Stone Matrix Asphalt* memiliki nilai antara 3% sampai 5%. Maka dari hasil penelitian nilai *VITM* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh pada kadar substitusi 75% dan 100% tidak memenuhi persyaratan.

2. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi Agregat Halus Terhadap Nilai *Void Filled with Asphalt* (VFWA)

Grafik hasil nilai VFWA akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.



Gambar 5. 11 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VFWA

Pada Gambar 5.11 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami penurunan nilai VFWA. Akan tetapi

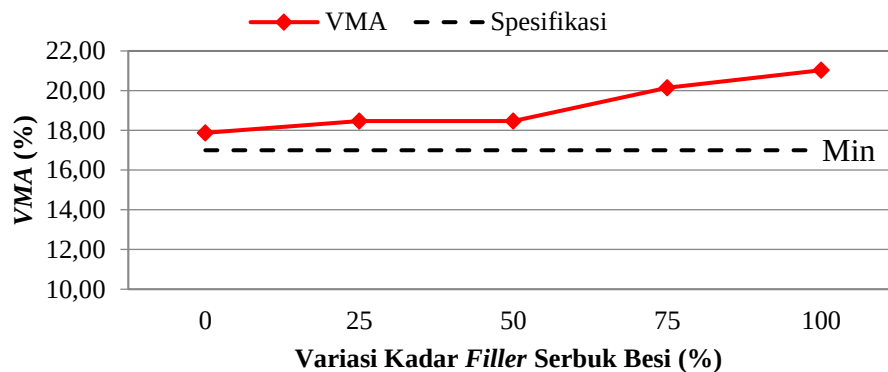
nilai *VFWA* masih memenuhi persyaratan minimum. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap nilai *VFWA*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai *VFWA* pada campuran. Maka dapat diindikasikan *filler* serbuk besi mampu menyerap aspal sehingga akan menyebabkan selimut aspal menjadi lebih tipis. Hal ini mengakibatkan campuran berkurangnya ketahanan terhadap deformasi permanen.

Penelitian ini sejalan dengan Tahir (2018) pada penelitiannya dalam setiap peningkatan penggunaan *filler* semen pada variasi kadar substitusi mengalami penurunan nilai *VFWA* dikarenakan aspal tidak mampu mengisi rongga campuran secara sempurna. Hasil yang didapat berbeda dengan penelitian Dewi (2019) pada penelitiannya menunjukkan nilai *VFWA* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *filler* batu bata, hal ini terjadi karena *filler* batu bata memiliki daya serap yang kuat menyerap aspal, sehingga aspal yang akan menutupi rongga antar agregat diserap oleh *filler* batu bata sehingga menjadikan rongga yang akan tertutup aspal menjadi lebih kecil.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VFWA* yaitu $> 65\%$. Maka dari hasil penelitian nilai *VFWA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

3. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi Agregat Halus Terhadap Nilai *Void Mineral Aggregate (VMA)*

Grafik hasil nilai *VMA* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut.



Gambar 5. 12 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VMA

Pada Gambar 5.12 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami peningkatan nilai VMA. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap kenaikan nilai VMA, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai VMA pada campuran. Hal ini disebabkan karena nilai pada *VFWA* mengalami penurunan dan nilai pada *VITM* mengalami kenaikan sehingga selaras dengan nilai pada VMA mengalami kenaikan. Nilai VMA yang meningkat akan mengakibatkan jarak pada antar agregat. Nilai VMA menjadi indikator pada keawetan serta durabilitas pada campuran.

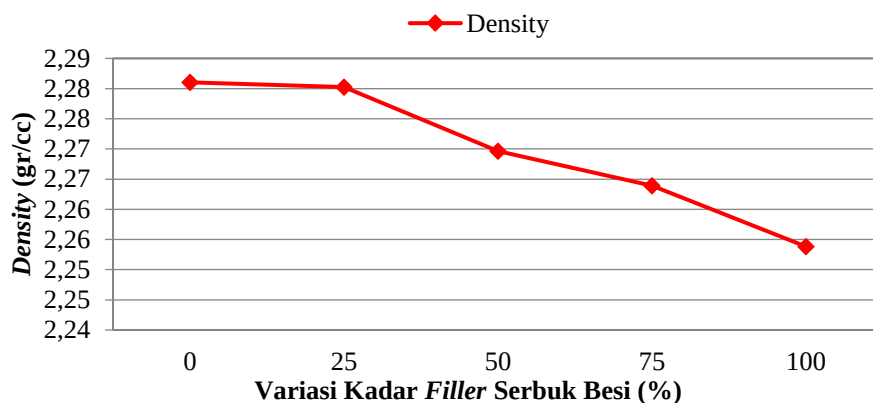
Penelitian ini sejalan dengan Utomo (2020) pada penelitiannya yang menggunakan limbah serbuk besi sebagai material pengisi (*filler*) didapatkan hasil nilai VMA yang cenderung mengalami peningkatan, hal tersebut menunjukkan campuran bahwa substitusi serbuk besi membuat persentase rongga terhadap agregat lebih tinggi. Penelitian ini juga sejalan dengan Rahman (2023) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* menghasilkan nilai VMA yang meningkat hal ini disebabkan kurangnya kepadatan campuran akibat menurunnya *workability* yang disebabkan karena penambahan *fly ash*.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai VMA yaitu $> 17\%$. Maka dari hasil penelitian nilai VMA pada campuran *Stone Matrix Asphalt*

dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

4. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *Density*

Grafik hasil nilai *density* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



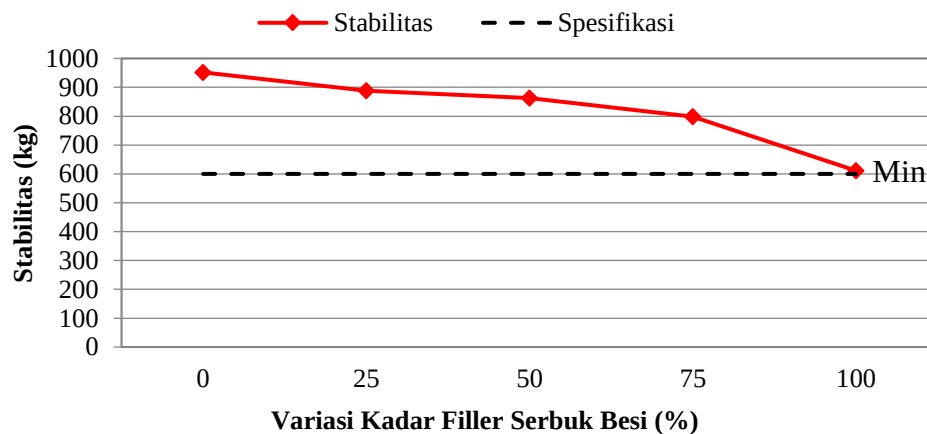
Gambar 5. 13 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density*

Pada Gambar 5.13 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami penurunan nilai *Density*. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai *density*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai *density* pada campuran. Hal ini disebabkan pada nilai *VFWA* mengindikasikan *filler* serbuk besi mampu menyerap aspal dan selimut aspal yang tebal serta mampu mengisi rongga. Hal ini menyebabkan aspal mencapai titik kejenuhannya, sehingga aspal yang berfungsi sebagai bahan ikat berubah fungsi sebagai pelicin, penurunan ini mengakibatkan campuran mengalami penurunannya kepada nilai kepadatannya.

Penelitian ini sejalan dengan Hidayat dan Kushari (2018) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa abu ampas tebu mengalami penurunan terhadap nilai *density*, hal ini disebabkan butir-butir abu ampas tebu yang sangat halus bercampur dengan aspal sehingga menyebabkan mastic lebih rendah.

5. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi Agregat Halus Terhadap Nilai Stabilitas

Grafik hasil nilai stabilitas akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.



Gambar 5. 14 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas

Pada Gambar 5.14 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami penurunan nilai stabilitas. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap nilai stabilitas, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai stabilitas pada campuran. Hal ini sejalan dengan nilai *VITM* yang mengindikasikan campuran memiliki rongga yang besar, nilai *VMA* mengidentifikasi rongga udara partikel – partikel agregat pada campuran semakin menjauh, nilai *density* mengidentifikasi campuran mengalami penurunan maka nilai stabilitas juga mengalami penurunan. Maka mengakibatkan campuran kurang kuat dalam menerima deformasi akan tetapi pada kadar substitusi 100% masih diatas minimum yang telah disyaratkan.

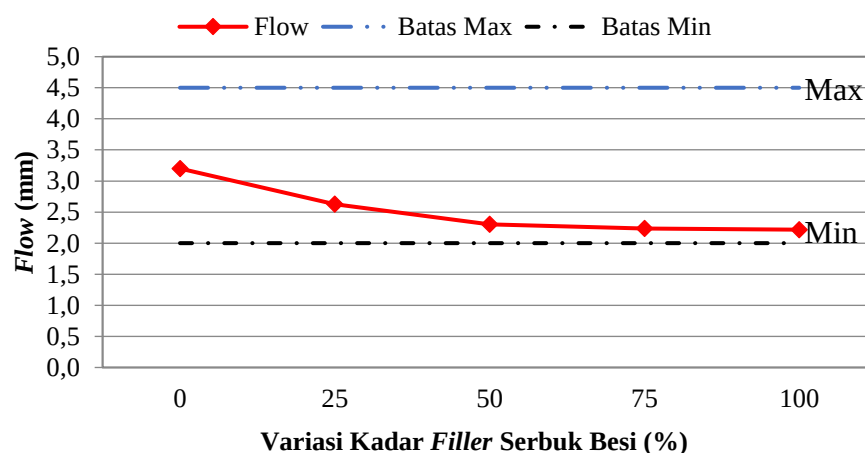
Penelitian ini sejalan dengan Oktariman (2023) pada penelitiannya menunjukkan nilai stabilitas yang cenderung menurun dengan bertambahnya substitusi kadar limbah serbuk besi, namun masih memenuhi syarat minimal nilai stabilitas. Penelitian ini sejalan dengan Dewi (2019) pada penelitiannya nilai stabilitas mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *filler* batu bata sampai variasi 60% : 40%, kemudian mengalami penurunan setelahnya

sampai pada variasi 0% : 100%, Hal ini terjadi karena adanya kandungan silika dan aluminium yang besar dari *filler* batu bata yang dapat meningkatkan kekakuan pada campuran dan adanya bahan tambah viatop66 pada campuran tersebut, sehingga ketika mencapai batas tertentu yaitu 60% : 40% kekuatan campuran akan berkurang pada variasi setelahnya yang disebabkan oleh campuran yang menjadi terlalu kaku. Penelitian ini sejalan dengan Hidayati (2018) dalam penelitiannya hubungan antara penambahan kadar *filler* abu sekam padi dengan masing-masing KAO yaitu pada campuran dengan *filler* pengganti abu sekam padi pada kadar *filler* pengganti abu sekam padi 75% mengalami penurunan karena proporsi *filler* yang berlebihan mengakibatkan ikatan antar butir agregat menjadi lemah.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai minimum stabilitas untuk campuran *Stone Matrix Asphalt* yaitu > 600 . Maka dari hasil penelitian nilai stabilitas pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

6. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Flow*

Grafik hasil nilai *flow* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5. 15 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Flow*

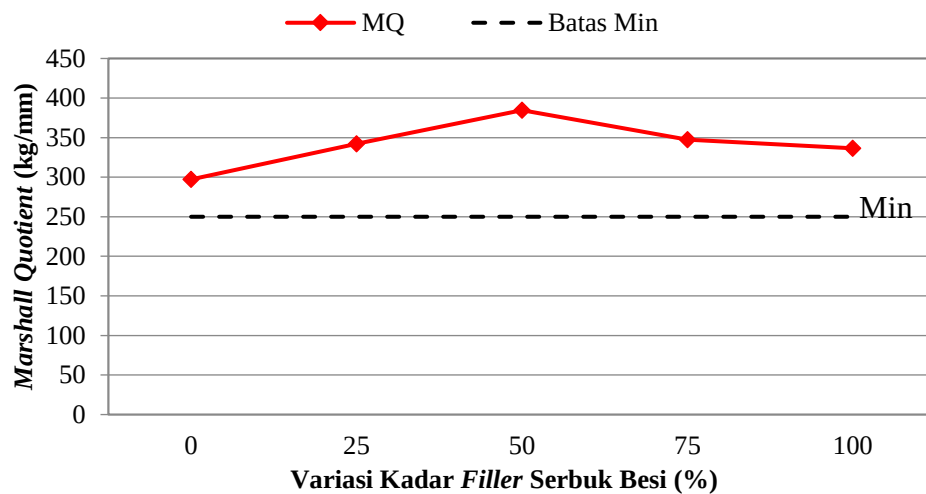
Pada Gambar 5.15 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami penurunan nilai *flow*. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai *flow*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai *flow* pada campuran. Hal ini disebabkan *filler* serbuk besi meningkatkan kekentalan pada aspal, dikarenakan memiliki kandungan silikon (Si), carbon (C), mangan (Mn), fosfor (P), sulfur (S), besi (Fe), sehingga campuran dengan nilai *flow* yang rendah mengakibatkan menjadi kaku.

Penelitian ini sejalan dengan Dewi (2019) pada penelitiannya bahwa variasi penggunaan *filler* batu bata menunjukkan nilai *flow* mengalami penurunan, hal tersebut dipengaruhi oleh *filler* batu bata terdapat kandungan silika dan aluminium yang besar sehingga meningkatkan kekakuan pada campuran. Penelitian ini sejalan dengan Fauziah, dkk (2012) dalam penelitian *fly ash* yang memiliki sifat *pozzolan*, dan memiliki kandungan yang terdiri dari silika, besi oksida, dan aluminium oksida yang ditambahkan pada aspal akan bereaksi dan membentuk senyawa yang membuat campuran menjadi keras dan kaku yang ditandai dengan semakin menurunnya nilai *flow* campuran.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* untuk campuran *Stone Matrix Asphalt* memiliki nilai antara 2,0 mm sampai 4,5 mm. Maka dari hasil penelitian nilai *flow* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

7. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi Agregat Halus Terhadap Nilai *Marshall Quotient (MQ)*

Grafik hasil nilai *MQ* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut.



Gambar 5. 16 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap MQ

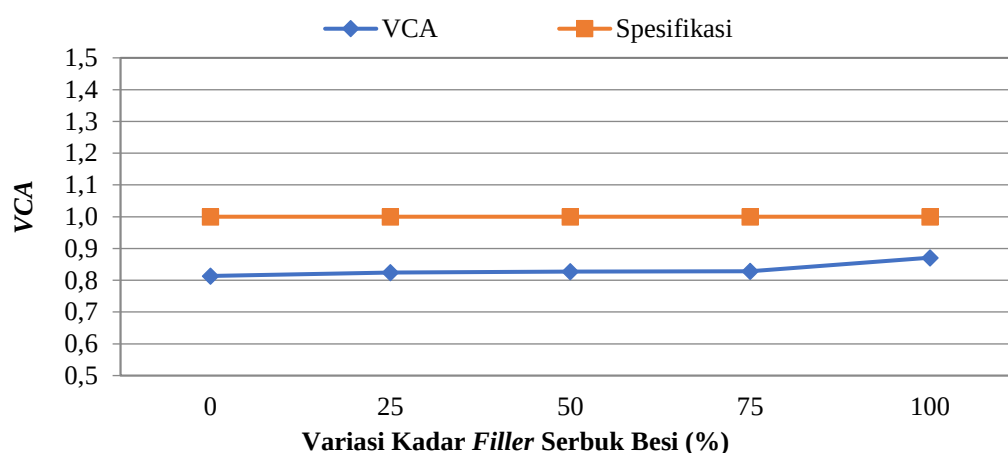
Pada Gambar 5.16 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai *MQ* sampai kadar substitusi *filler* serbuk besi 50% dan mengalami penurunan kembali pada kadar substitusi *filler* serbuk besi 75%. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai *MQ*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai *MQ* pada campuran. Sehingga nilai *MQ* pada titik optimum memiliki fleksibilitas yang rendah maka mengakibatkan campuran tidak mudah berdeformasi kemudian setelah mencapai titik optimum campuran memiliki fleksibilitas yang tinggi maka mengakibatkan campuran mudah terjadi deformasi.

Menurut Dewi (2019) pada penelitiannya menunjukkan nilai *MQ* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya proporsi *filler* batu bata yang digunakan namun mengalami penurunan kembali ketika sudah mencapai batas optimum penggunaan. Hal ini disebabkan adanya kandungan silika dan aluminium yang cukup besar dari *filler* batu bata yang dapat meningkatkan kekakuan pada campuran dan karena campuran *SMA* yang memiliki gradasi senjang.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai MQ yaitu > 250 kg/mm. Maka dari hasil penelitian nilai MQ pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

5.2.7 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai VCA

Grafik hasil nilai VCA akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut.



Gambar 5. 17 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VCA

Pada Gambar 5.17 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami peningkatan nilai VCA. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai VCA, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai VCA pada campuran. Hal tersebut sejalan dengan meningkatnya nilai *VITM* dan *VMA* serta terjadi penurunan pada nilai *VFWA*. Maka dari itu campuran memiliki rongga yang cukup besar, yang mana kurangnya *stone-on-stone contact* pada antar agregat campuran, namun nilai VCA yang diperoleh masih sesuai dengan persyaratan. Sehingga campuran masih mampu dalam menahan beban deformasi.

Penelitian ini sejalan dengan Brown dan Haddock (1997) menyimpulkan bahwa nilai VCA_{MIX} harus lebih kecil atau sama dengan VCA_{DRC} untuk

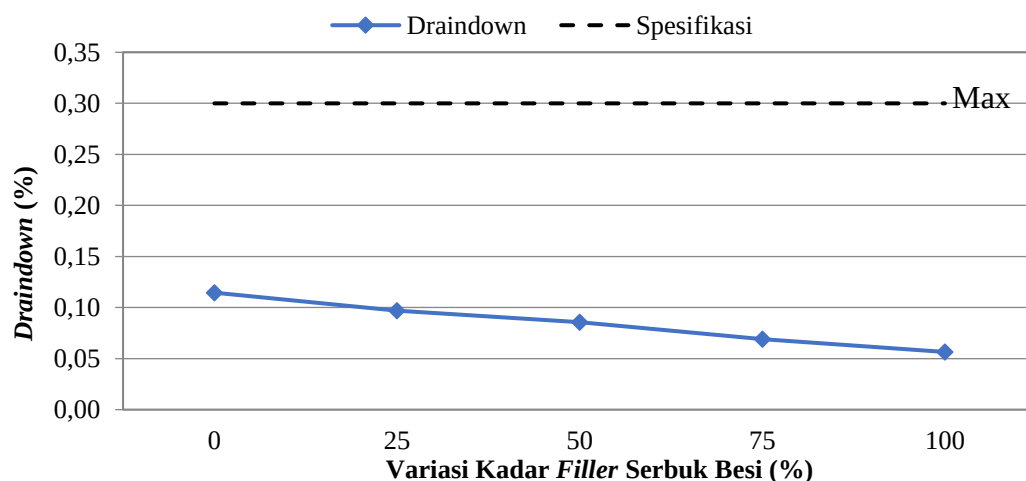
memastikan adanya *stone-on-stone contact* dalam campuran, hal ini dikarenakan campuran *Stone Matrix Asphalt* harus memiliki kemampuan menahan lalu lintas yang padat tanpa adanya *rutting*, untuk mendapatkan kemampuan ini berasal dari *stone-on-stone contact*.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai rasio $VCA_{mix}/VCA_{DRC} < 1,0$. Maka dari hasil penelitian nilai *VCA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan. Sehingga menunjukkan bahwa campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm memiliki kontak agregat yang baik.

5.2.8 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *Draindown*

Draindown merupakan kondisi dimana agregat dan aspal memisahkan diri dari sampel secara keseluruhan dan mengalir ke bawah dari campuran tersebut (pengaliran aspal). Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui jumlah pengaliran aspal yang terjadi saat kondisi suhu pencampuran pada campuran yang belum dipadatkan.

Grafik hasil nilai *draindown* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5. 18 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Draindown*

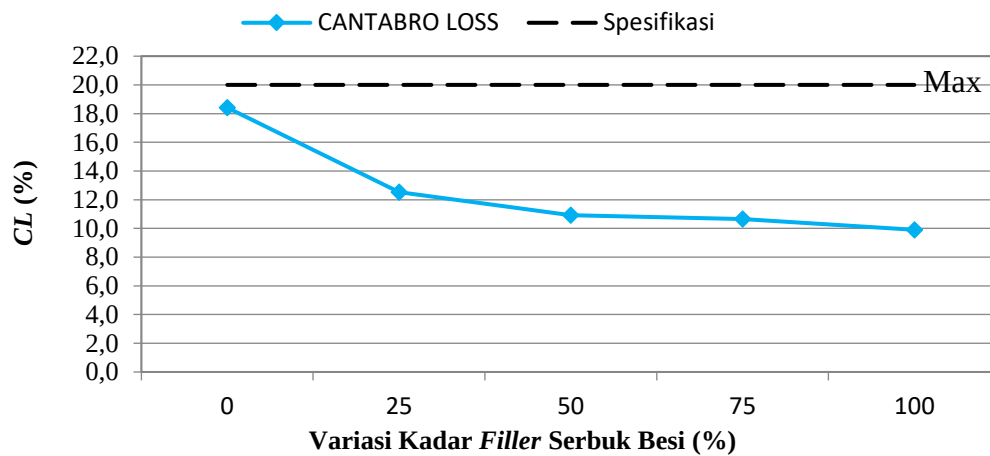
Pada Gambar 5.18 dapat dilihat bahwa dengan substitusi variasi kadar *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap penyerapan aspal sehingga mengakibatkan *draindown* mengalami penurunan. Dari hasil analisis statistik ANOVA menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap penurunan nilai *draindown*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai *draindown* pada campuran. Hal ini menunjukkan bahwa aspal tercampur secara homogen tanpa terjadi pemisahan pada aspal seiring penambahan *filler* serbuk besi, sehingga aspal pada campuran lebih terikat.

Hal ini sejalan dengan Syammaun, dkk (2020) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan *filler* tempurung kelapa menurunkan nilai *draindown*, hal ini menyebabkan tingkat pemisahan aspal dalam campuran semakin kecil.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *draindown* yaitu <0,3%. Maka dari hasil penelitian nilai *draindown* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

5.2.9 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *Cantabro Loss*

Nilai *cantabro loss* menggambarkan ketahanan benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *los angeles*. Pelaksanaan pengujian ini benda uji dimasukkan ke dalam mesin *los angeles* untuk mengetahui tingkat keausannya. *cantabro loss* memberikan gambaran sejauh mana ketahanan perkerasan aspal menahan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan. Grafik hasil nilai *cantabro loss* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.



Gambar 5. 19 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Cantabro Loss*

Pada Gambar 5.19 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran diperoleh nilai *cantabro loss* yang mengalami penurunan. Dari hasil analisis statistik ANOVA menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap penurunan nilai *cantabro loss*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai *cantabro loss* pada campuran. Hal ini disebabkan *filler* serbuk besi memiliki berat jenis yang lebih berat dibandingkan dengan berat jenis debu batu. Sehingga *filler* serbuk besi dapat membuat campuran mempertahankan kondisi awal akibat efek benturan yang diterima, dan penambahan *filler* serbuk besi mengakibatkan aspal menjadi lebih tidak plastis dan kaku.

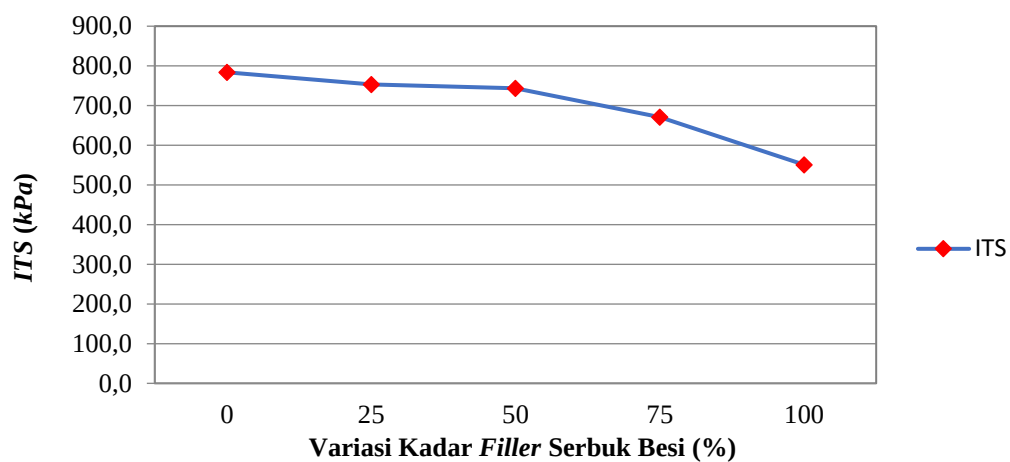
Penelitian ini sejalan dengan Rahman (2023) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan *filler fly ash* mempengaruhi nilai *cantabro loss* yang menurun, dikarenakan substitusi *filler fly ash* mampu menciptakan *interlocking* antara material yang lebih baik sehingga mampu mempertahankan kondisi awal terhadap efek benturan yang diterima, kemampuan *interlocking* ini merupakan dampak dari substitusi *fly ash* yang mampu mengisi rongga pada campuran.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu sebarang $< 20\%$. Maka dari hasil penelitian nilai *cantabro loss* pada campuran *Stone Matrix*

Asphalt dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

5.2.10 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *ITS*

Indirect Tensile Strength (ITS) adalah pengujian yang berguna untuk mengetahui nilai gaya tarik tidak langsung pada campuran aspal akibat beban lalu lintas. Grafik hasil nilai *ITS* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.20 berikut.



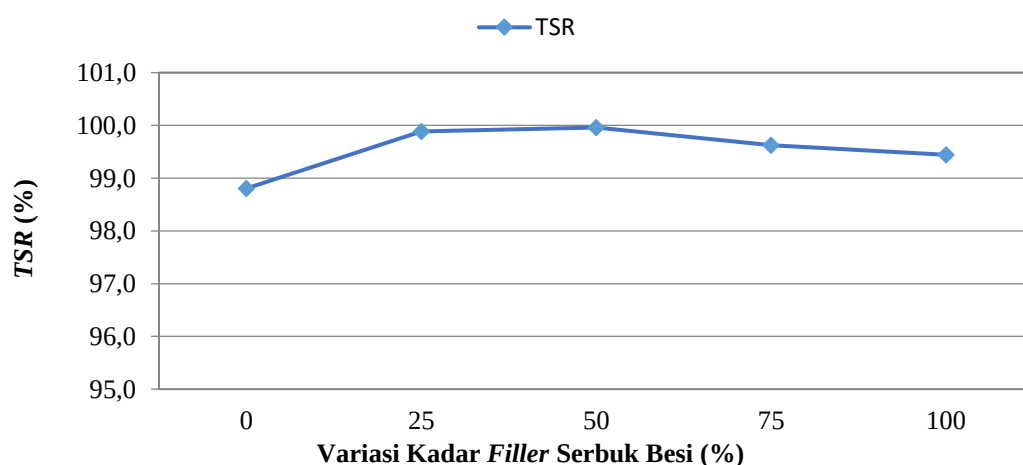
Gambar 5. 20 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap ITS

Pada Gambar 5.20 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami penurunan nilai *ITS*. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi signifikan terhadap penurunan nilai *ITS*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi berpengaruh terhadap nilai *ITS* pada campuran. Hal ini disebabkan *filler* serbuk besi menyerap aspal lebih banyak sehingga mengakibatkan sisa aspal untuk mengikat agregat semakin sedikit, penurunan nilai *ITS* mengindikasikan campuran mengurangi kemampuan untuk menahan kuat tarik yang disebabkan oleh beban kendaraan yang berefek kepada kerusakan berupa *rutting* atau deformasi permanen.

Penelitian ini sejalan dengan Hidayat (2019) pada penelitiannya nilai *ITS* campuran SMA 25 mm dengan variasi penambahan kadar *filler* abu ampas tebu cenderung menurun walau terdapat kenaikan pada saat penambahan kadar *filler* abu ampas tebu 50%. Hal ini karena lebar retak yang terjadi pada campuran SMA 25 mm lebih besar seiring bertambahnya kadar *filler* pengganti abu ampas tebu. Penelitian ini tidak sejalan dengan Dewi (2019) pada penelitiannya *ITS* campuran dengan *filler* batu bata memiliki kemampuan dalam menahan gaya tarik, dan memiliki kekakuan lebih baik dari campuran dengan menggunakan abu batu. Kombinasi dari *filler* batu bata dan abu batu juga yang mampu menahan gaya tarik dan memiliki kekakuan lebih tinggi ketika *filler* batu bata yang digunakan dalam campuran lebih banyak dibandingkan dengan campuran yang abu batunya lebih sedikit. Hal tersebut ditandai dengan kenaikan nilai *ITS* pada campuran.

5.2.11 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *TSR*

Nilai *TSR* diperoleh dari perbandingan kekuatan daya tahan tarik pada bahan uji dengan perendaman selama 24 jam pada *waterbath* dengan suhu 60°C terhadap bahan uji tanpa rendaman. Nilai ini didapat dari perbandingan hasil daya tahan tarik yang kemudian diubah kedalam bentuk persen. Grafik hasil nilai *TSR* akibat pengaruh substitusi *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.21 berikut.



Gambar 5. 21 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *TSR*

Pada Gambar 5.21 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami peningkatan hingga kadar variasi substitusi 50% dan mengalami penurunan di 75% dan 100 %. Dari hasil analisis statistik ANOVA menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai TSR, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai TSR pada campuran. Sehingga pada kadar substitusi 75% dan 100% durabilitas mengalami penurunan dikarenakan setelah menacapai titik optimum dengan bertambahnya kadar *filler* serbuk besi menyebabkan rongga yang cukup besar sehingga campuran mudah retak akan tetapi masih memenuhi spesifikasi persyaratan.

Pada kadar 0% sampai 50% mengalami peningkatan nilai TSR yang dimana selajalan dengan Fauziah (2012) menyatakan bahwa *fly ash* mampu mengisi rongga pada campuran sehingga peningkatan viskositas dan kohesi aspal mampu memberikan efek yang signifikan dalam mempertahankan stabilitasnya terhadap gangguan air, sehingga kekedapan terhadap campuran dan keawetan meningkat.

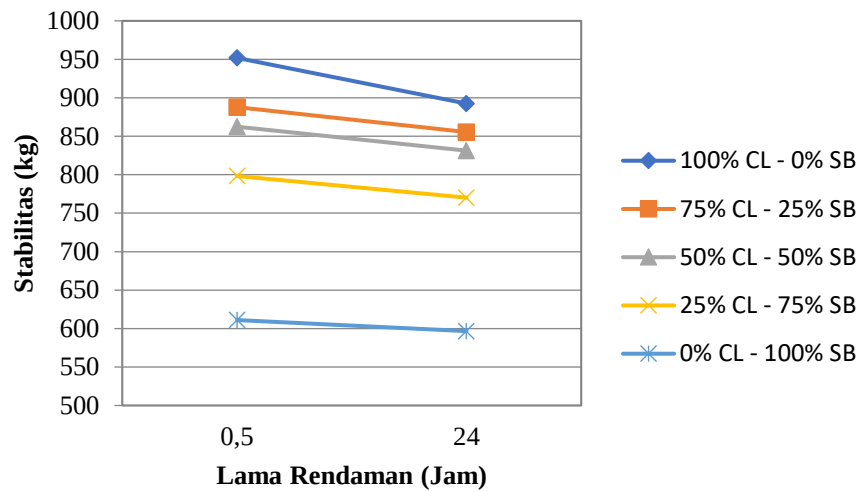
Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai TSR yaitu $> 80\%$. Maka dari hasil penelitian nilai TSR pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

5.2.12 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai IRS

Pengujian rendaman (*Immersion Test*) bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik campuran akibat pengaruh air, suhu, dan cuaca.

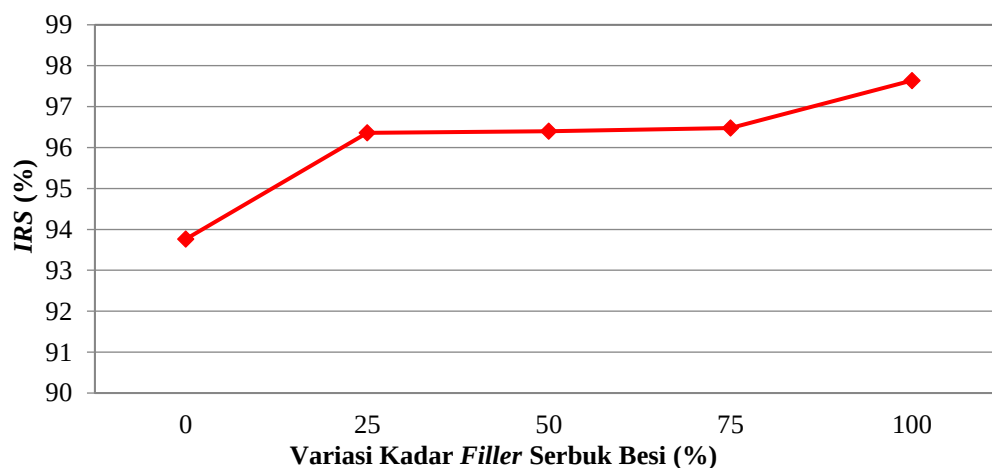
1. *Index of Retained Strength (IRS)*

Proses perendaman pada pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* bertujuan mengetahui durabilitas campuran aspal, untuk mengevaluasi keawetan campuran dan mengetahui nilai Indeks durabilitas pertama (IDP) dan indeks durabilitas kedua (IDK) dengan membandingkan kekuatan tekan benda uji yang direndam dengan perendaman 0,5 jam terhadap 24 jam pada suhu 60°C. Nilai stabilitas rendaman 0,5 jam dan rendaman 24 jam dapat dilihat pada Gambar 5.22 berikut.



Gambar 5. 22 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.22 dapat diketahui bahwa nilai stabilitas pada rendaman 24 jam lebih rendah dibandingkan dengan rendaman 0,5 jam. Hal ini dikarenakan proses perendaman yang selama waktu 24 jam menyebabkan air masuk ke dalam pori-pori campuran sehingga mengurangi ikatan adhesi antara aspal dan agregat. Grafik nilai *IRS* akibat pengaruh variasi substitusi serbuk besi dapat dilihat pada Gambar 5.23 berikut.



Gambar 5. 23 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi Filler Terhadap IRS

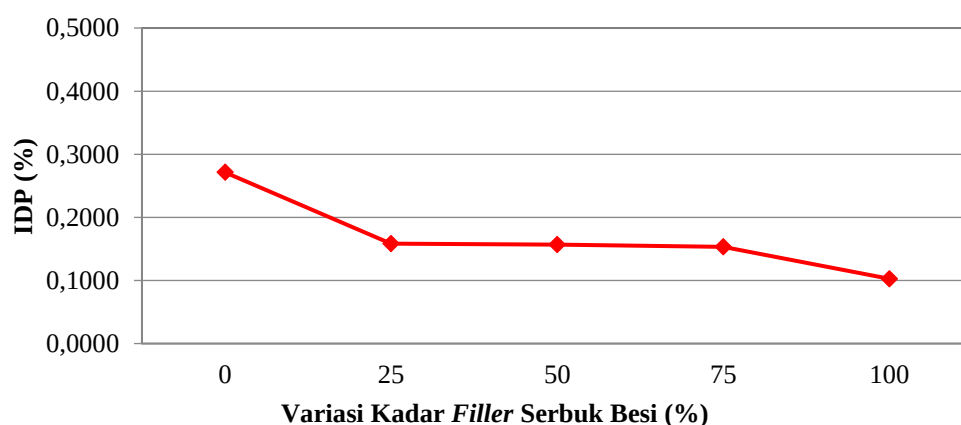
Pada Gambar 5.23 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* serbuk besi nilai *IRS* mengalami peningkatan. Dari hasil analisis statistik anova menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai *IRS*, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai *ISR* pada campuran. Hal ini disebabkan karena *filler* serbuk besi memiliki pengaruh kekentalan pada aspal sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap air, suhu, dan cuaca. Maka menyebabkan campuran menjadi lebih awet dan mampu mempertahankan kekuatannya.

Penelitian ini sejalan dengan Hidayati (2018) pada penelitiannya bahwa penggunaan *filler* ASP pada campuran SMA menunjukkan terjadi peningkatan nilai *IRS* pada setiap kadar, namun terjadi sedikit penurunan pada variasi kadar 50% dan penggunaan *filler* pengganti ASP terbukti lebih cenderung meningkat dibandingkan dengan 0% ASP.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *IRS* yaitu $> 90\%$. Maka dari hasil penelitian nilai *IRS* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi campuran *filler* serbuk besi yang diperoleh masih memenuhi persyaratan.

2. Indeks Durabilitas Pertama (IDP)

Indeks Durabilitas Pertama (IDP) menunjukkan hilangnya persentase kekuatan selama perendaman, berikut adalah grafik hasil dari IDP dapat dilihat pada Gambar 5.24 berikut.

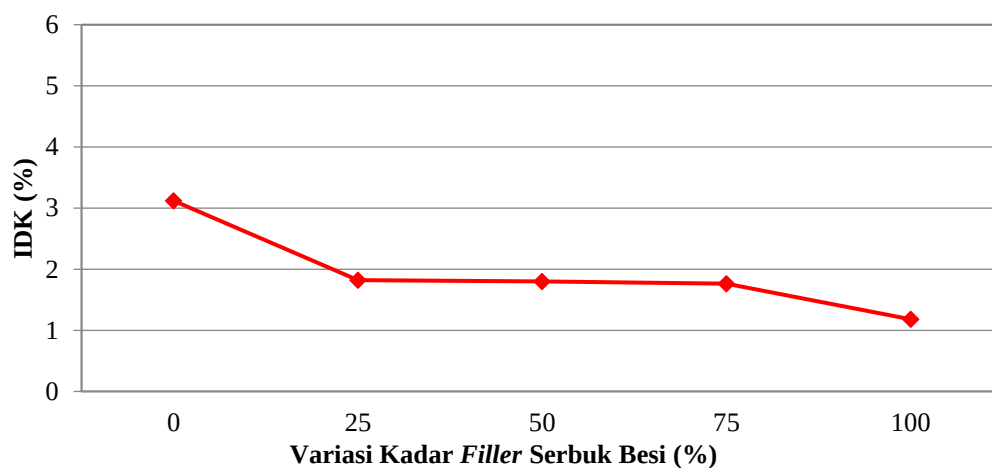


Gambar 5. 24 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap IDP

Pada Gambar 5.24 dapat dilihat bahwa dengan kadar substitusi *filler* serbuk besi nilai IDP mengalami penurunan. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai IDP, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai IDP pada campuran. Hal ini mengindikasikan substitusi *filler* serbuk besi mengalami pengurangan stabilitas akibat rendaman. Penurunan stabilitas yang relatif kecil dikarenakan *filler* serbuk besi membuat aspal menjadi kaku, sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap pengaruh suhu dan air.

3. Indeks Durabilitas Kedua (IDK)

Indeks Durabilitas Kedua merupakan indicator lain yang dapat digunakan untuk melihat tingkat durabilitas campuran selain nilai *IRS* dan IDP. Berikut adalah grafik hasil dari IDK dapat dilihat pada Gambar 5.25 berikut.

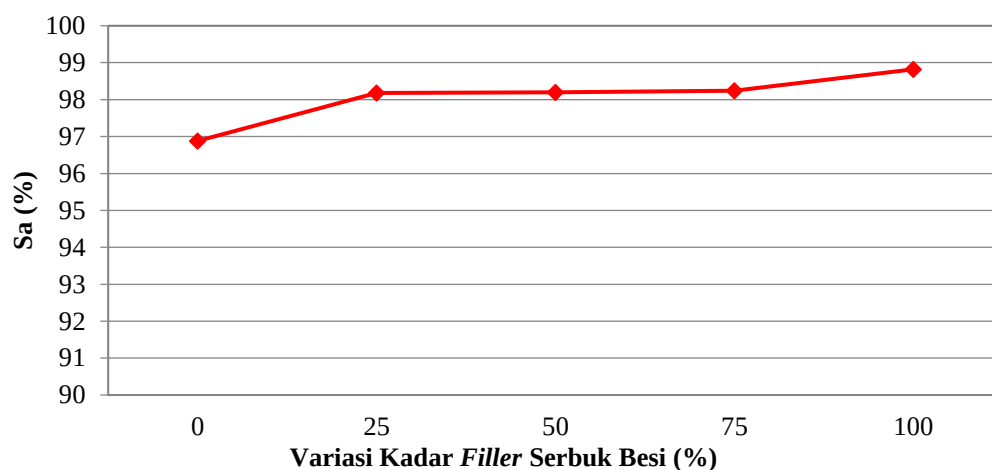


Gambar 5. 25 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap IDK

Pada Gambar 5.25 dapat dilihat bahwa bahwa dengan kadar substitusi *filler* serbuk besi nilai IDK mengalami penurunan. Dari hasil analisis statistik *ANOVA* menunjukkan *filler* serbuk besi tidak signifikan terhadap nilai IDK, hal ini mengindikasikan campuran dengan substitusi *filler* serbuk besi tidak berpengaruh terhadap nilai IDK pada campuran. Pada nilai IDK menunjukkan semakin kecil nilainya maka semakin kecil juga kehilangan kekuatan. Nilai yang

relatif kecil disebabkan substitusi *filler* serbuk besi membuat aspal menjadi lebih kaku, sehingga dapat mempertahankan kehilangan kekuatan rata – rata akibat proses perendaman.

Nilai IDK dapat menyatakan persentase ekuivalen kekuatan sisa satu hari (Sa) dapat dilihat pada Gambar 5.26 berikut.



Gambar 5. 26 Grafik Pengaruh Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Sa

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.26 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* serbuk besi nilai Sa mengalami peningkatan. Pada nilai kekuatan sisa satu hari yang mengalami peningkatan mengidentifikasi bahwa campuran memiliki durabilitas yang baik terhadap suhu air dan cuaca. Hal ini dapat dilihat nilai Sa mengalami peningkatan yang mengidentifikasi setiap penambahan substitusi *filler* serbuk besi pada campuran mengalami kehilangan kekuatan yang sedikit.

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Serbuk Besi

Rekapitulasi hasil pengujian pada campuran dengan menggunakan *filler* serbuk besi dapat dilihat pada Tabel 5.18.

Tabel 5.19 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Limbah Serbuk Besi

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler</i> Limbah Serbuk Besi (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	Stabilitas (kg)	853,636	895,750	911,712	922,976	1017,577	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai stabilitas mengalami penurunan signifikan. Sehingga campuran kurang kuat dalam menerima deformasi.
	<i>Flow</i> (mm)	3,133	2,900	2,825	2,750	2,675	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>flow</i> mengalami penurunan tidak signifikan. Sehingga campuran menjadi lebih kaku.
	<i>MQ</i> (kg/mm)	272,631	308,805	322,760	336,795	380,476	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>MQ</i> mengalami peningkatan tidak signifikan sampai titik optimum sehingga tidak mudah berdeformasi kemudian mengalami penurunan setelah titik optimum sehingga campuran memiliki fleksibilitas yang tinggi maka campuran mudah terdeformasi.

Lanjutan Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Limbah Serbuk Besi

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler</i> Limbah Serbuk Besi (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan	<i>ITS</i> (kPa)	783,81	753,34	743,91	671,14	551,04	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>ITS</i> mengalami penurunan signifikan. Sehingga kurang mampu dalam menahan kuat tarik.
Volumetrik	<i>VITM</i> (%)	3,72	4,31	4,38	6,09	7,04	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>VITM</i> mengalami peningkatan signifikan. Sehingga menyebabkan campuran memiliki rongga udara yang besar.
	<i>VFWA</i> (%)	79,22	76,78	76,47	70,24	66,58	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>VFWA</i> mengalami penurunan signifikan. Selimut aspal yang tipis sehingga membuat campuran kurang tahan deformasi permanen.
	<i>VMA</i> (%)	17,88	18,47	18,47	20,14	21,03	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>VMA</i> mengalami peningkatan signifikan. Sehingga meningkatkan jarak antar agregat.

Lanjutan Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Limbah Serbuk Besi

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler</i> Limbah Serbuk Besi (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik	VCA	0,814	0,824	0,828	0,829	0,871	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai VCA mengalami peningkatan tidak signifikan. Sehingga campuran masih mampu menahan deformasi karena masih masuk spesifikasi yang disyaratkan.
	Density (gr/cc)	2,281	2,280	2,270	2,264	2,254	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>density</i> mengalami penurunan tidak signifikan. Sehingga campuran menjadi cenderung kurang rapat.
Durabilitas	IRS (%)	93,76	96,36	96,40	96,47	97,64	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai IRS mengalami peningkatan tidak signifikan. Sehingga campuran tahan terhadap air, suhu, dan udara maka mengakibatkan campuran lebih awet.

Lanjutan Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Limbah Serbuk Besi

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler</i> Limbah Serbuk Besi (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas	IDP (%)	0,271	0,158	0,157	0,153	0,103	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai IDP mengalami penurunan tidak signifikan. Sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap pengaruh suhu dan air.
	IDK (%)	3,120	1,822	1,802	1,763	1,181	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai IDK mengalami penurunan tidak signifikan. Sehingga campuran dapat mempertahankan kehilangan rata-rata akibat proses perendaman.
	<i>Draindown</i> (%)	0,115	0,097	0,086	0,069	0,057	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>draindown</i> mengalami penurunan signifikan. Sehingga aspal pada campuran lebih terikat dikarenakan tercampur secara homogen.

Lanjutan Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Limbah Serbuk Besi

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler</i> Limbah Serbuk Besi (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas	<i>Cantabro Loss (%)</i>	18,41	12,52	10,92	10,66	9,90	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>cantabro loss</i> mengalami penurunan signifikan. Sehingga campuran memiliki kemampuan ketahan terhadap benturan yang diterima.
	<i>TSR (%)</i>	98,805	99,885	99,960	99,626	99,445	Semakin besar substitusi <i>filler</i> serbuk besi, maka nilai <i>TSR</i> mengalami peningkatan tidak signifikan. Sehingga campuran memiliki durabilitas yang baik pada kadar titik optimumnya.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Pada penelitian yang telah dilakukan dari karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi kadar substitusi *filler* serbuk besi sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai variasi substitusi *filler* memiliki pengaruh terhadap kekuatan, dimana pada kadar substitusi optimum 50% menghasilkan campuran yang kaku dan tahan deformasi, akan tetapi tidak tahan terhadap kuat tariknya.
2. Pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai variasi substitusi *filler* memiliki pengaruh terhadap volumetrik, dimana menghasilkan campuran menjadi lebih berongga. Pada substitusi titik optimum sebesar 50% campuran memiliki selimut aspal dan kontak antar agregat yang baik.
3. Pengaruh penggunaan limbah serbuk besi sebagai variasi substitusi *filler* memiliki pengaruh terhadap durabilitas, dimana menghasilkan campuran yang mampu menerima repetisi beban lalu lintas serta mampu menahan keausan akibat pengaruh cuaca iklim, seperti udara, air, atau perubahan temperatur.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat memberikan saran sebagai berikut.

1. Dikarenakan penelitian ini belum menguji terkait sifat dan senyawa yang terkandung dalam limbah serbuk besi, maka perlu dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk mengetahui pengaruh terhadap campuran *Stone Matrix Asphalt*.
2. Penggunaan limbah serbuk besi sebagai *filler* pengganti dapat direkomendasikan hingga kadar *filler* pengganti 50%, untuk menghasilkan campuran yang memiliki kekuatan struktur optimum dan durabilitas yang baik.
3. Perlunya memanfaatkan limbah serbuk besi sebagai bahan pengisi campuran aspal sehingga limbah serbuk besi lebih bermanfaat sebagai pengganti *filler*.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Official. 1997. *Standard Test Method for Solubility of Asphalt Trichloroethylene*. ASTM designation: D 2042. Philadelphia.
- American Association of State Highway and Transportation Official. 2018. *Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Void in Aggregate*. ASTM designation: C 29/C 29m-09. Philadelphia.
- American Association of State Highway and Transportation Official. 2018. *Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*. ASTM designation: T 305-14. Philadelphia.
- Dewi, S.R.K., Widianty, D., Hasyim. 2019. Karakteristik *Stone Matrix Asphalt* Dengan Bahan Tambah Viatop⁶⁶ Menggunakan Variasi *Filler* Debu Batu Dan Batu Bata. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Mataram. Mataram.
- Direktorat Jendral Bina Marga. 2020. *Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2 Divisi 6*. Penerbit Bina Marga. Jakarta.
- Fauziah, Sukarno, Syaifurrohman, Marzuko, dan Denny. 2012. Studi Eksperimental Penggunaan Fly Ash Sebagai Additive Terhadap Kinerja Beton Aspal Sebagai Upaya Pemanfaatan Material Limbah. *Jurnal Rekayasa Sipil Vol.2 No.1_Studi Eksperimental*.
- Hidayat, R., Kushari, B. 2019. Analisis Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* Dengan Debu Ampas Tebu Sebagai *Filler* Pengganti. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Hidayati, E.T., Fauziah, M. 2018. Pengaruh Debu Sekam Padi Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA). *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Oktariman, M.I., Rahmat, Veronika,. Pengaruh Penggunaan Limbah Serbuk Besi Sebagai Pengganti Filler Terhadap Campuran Aspal Beton Ac-Bc. *Kumpulan Executive Summary Tugas Akhir Wisudawan Teknik Sipil Ke-80*. Vol. 2 No. 1 (2023).
- Saputra, I., Rosalina., Yusnar, C. 2021. Substitusi Parsial Agregat Halus Dengan Serbuk Besi Pada Campuran Laston AC-WC. *Jurnal Sipil Sains Terapan*. Buketrata, Maret 2021: Volume 04, Nomor 01.

- Sukirman, S. 2016. *Beton Aspal Campuran Panas*. Penerbit Institut Teknologi Nasional. Bandung.
- Sukirman, S. 2010. *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Jalan*. Penerbit Nova. Bandung.
- Sukirman, S. 2003. *Beton Aspal Campuran Panas*. Penerbit Grani. Jakarta.
- Sukirman, S. 1992. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Penerbit Nova. Bandung.
- Standar Nasional Indonesia. 1997. *Metode Pengujian Agregat Halus Atau Pasir Yang Mengandung Bahan Plastik Dengan Cara Setara Pasir*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2002. *Spesifikasi Bahan Pengisi Untuk Campuran Beraspal*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2008. *Cara Uji Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2008. *Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2008. *Cara Uji Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Cara Uji Daktilitas Aspal*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Cara Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Dengan Alat Cleveland Open Cup*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Cara Uji Titik Lembek Aspal Dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Cara Uji Berat Jenis Aspal Keras*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Cara Uji Penetrasi Aspal*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Pengujian Kelekatan Agregat Terhadap Aspal*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

- Standar Nasional Indonesia. 2011. *Metode Uji Untuk Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2012. *Metode Pengujian Untuk Analisa Saringan Agregat Halus dan kasar*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2015. *Spesifikasi Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2016. *Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2016. *Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Sukirman, S. 1992. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Penerbit Nova. Bandung.
- Sukirman, S. 2003. *Beton Aspal Campuran Panas*. Penerbit Grani. Jakarta.
- Sukirman, S. 2016. *Beton Aspal Campuran Panas*. Penerbit Institut Teknologi Nasional. Bandung.
- Tahir, A., Mashuri., Arifin, S.. 2018. Karakteristik Draindown Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Yang Menggunakan *Filler* Debu-Batu Dan Semen. *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-21*. Universitas Brawijata. Malang, 19 – 20 Oktober 2018.
- Utomo, N., Wahjudijanto, I., Yasin, F.S.R. 2020. Penggunaan Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengisi (*Filler*) Pada Campuran Struktur Perkerasan Jalan Kolektor Ponco-Jatirogo (STA.130+200-STA.138+700). *Jurnal Envirotek Vol 12 No 2 (2020)*.

LAMPIRAN

Lampiran 30. Hasil Analisis ANOVA Terhadap Karakteristik *Marshall*

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Stabilitas	Between Groups	177297.480	4	44324.370	16.776	<.001
	Within Groups	26421.491	10	2642.149		
	Total	203718.971	14			
Flow	Between Groups	2.082	4	.521	2.740	.089
	Within Groups	1.900	10	.190		
	Total	3.982	14			
MQ	Between Groups	11868.748	4	2967.187	.351	.838
	Within Groups	84561.787	10	8456.179		
	Total	96430.535	14			
VITM	Between Groups	23.308	4	5.827	4.147	.031
	Within Groups	14.052	10	1.405		
	Total	37.360	14			
VFWA	Between Groups	329.812	4	82.453	3.697	.043
	Within Groups	223.042	10	22.304		
	Total	552.854	14			
VMA	Between Groups	21.113	4	5.278	5.199	.016
	Within Groups	10.151	10	1.015		
	Total	31.264	14			
Density	Between Groups	.002	4	.000	.477	.752
	Within Groups	.008	10	.001		
	Total	.010	14			

Lampiran 31. Hasil Analisis ANOVA Terhadap *IRS*, *IDP*, *IDK*, *ITS*, *TSR*, *VCA*, *Cantabro Loss*, dan *Draindown*

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
VCA	Between Groups	.005	4	.001	2.752	.095
	Within Groups	.004	9	.000		
	Total	.010	13			
Draindown	Between Groups	.006	4	.002	18.654	<.001
	Within Groups	.001	10	.000		
	Total	.007	14			
Cantabro	Between Groups	142.822	4	35.705	14.659	<.001
	Within Groups	24.357	10	2.436		
	Total	167.179	14			
IRS	Between Groups	42.561	4	10.640	.304	.869
	Within Groups	349.973	10	34.997		
	Total	392.533	14			
IDP	Between Groups	.081	4	.020	.304	.869
	Within Groups	.661	10	.066		
	Total	.742	14			
IDK	Between Groups	10.654	4	2.663	.304	.869
	Within Groups	87.503	10	8.750		
	Total	98.157	14			
ITS	Between Groups	9.680	4	2.420	3.795	.040
	Within Groups	6.377	10	.638		
	Total	16.057	14			
TSR	Between Groups	3.203	4	.801	.006	1.000
	Within Groups	1438.681	10	143.868		
	Total	1441.884	14			



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

- 1 Sumber Material : Pertamina Cilacap
- 2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diuji Pada : 2023

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	23,65	20,25
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	46,48	42,81
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	22,83	22,56
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	24,8	21,3
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,15	1,05
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	46,54	42,85
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	21,74	21,55
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,09	1,01
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,06	1,040
10	Rata-rata BJ Aspal	1,047	

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Budi Kuntari, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 2 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

- 1 Sumber Material : Pertamina Cilacap
- 2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diuji Pada : 2023

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda uji			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.00 WIB	
	Selesai pemanasan	135 °C	09.15 WIB	
2	Didiamkan pada suhu ruang			
	Mulai	135 °C	09.30 WIB	
	Selesai	28 °C	11.00 WIB	
3	Diperiksa			
	Mulai	5 °C	11.00 WIB	
	Selesai	48 °C	11.14 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)		Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I	Benda Uji II	I	II
1	5 °C	0 detik	0 detik		
2	10 °C	103 detik	103 detik		
3	15 °C	209 detik	209 detik		
4	20 °C	301 detik	301 detik		
5	25 °C	386 detik	386 detik		
6	30 °C	464 detik	464 detik		
7	35 °C	664 detik	664 detik		
8	40 °C	666 detik	666 detik		
9	45 °C	766 detik	766 detik		
10	50 °C	823 detik	792 detik	48°C	48°C
11	55 °C				
12	60 °C				

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kusnari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalirejo km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

RUJUKAN, AASHTO T 48-74, ASTM D 92-52

- 1 Sumber Material : Pertamina Cilacap
- 2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diuji Pada : 2023

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda uji			
	Mulai pemanasan	27 °C	09.00 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	09.15 WIB	
2	Didiamkan pada suhu ruang			
	Mulai	130 °C	09.15 WIB	
	Selesai	27 °C	10.20 WIB	
3	Diperiksa			
	Mulai	27 °C	10.20 WIB	
	Selesai	325 °C	11.00 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	270 °C	290 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	270 °C	290 °C	



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

[Signature]
Ir. Berlian Keshatri, M.Eng, IPM, ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

[Signature]
Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

[Signature]
Roby Octavian
NIM : 20 511 116



**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 4 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

RUJUKAN; AASHTO T 49-68, ASTM D 5-71

- 1 Sumber Material : Pertamina Cilacap
- 2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diuji Pada : 2023

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda uji			
	Mulai pemanasan	27 °C	10.00 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	10.30 WIB	
2	Didiamkan pada suhu ruang			
	Mulai	130 °C	10.30 WIB	
	Selesai	27 °C	13.00 WIB	
3	Diperiksa			
	Mulai	25 °C	13.00 WIB	
	Selesai	25 °C	13.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	62	61			
2	70	64			
3	63	65			
4	64	70			
5	68	68			
Rata2	65,4	65,6			
Rata2	65,5				

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 5 Pemeriksaan Kelarutan Aspal dalam TCE

PEMERIKSAAN KELARUTAN ASPAL DALAM CCL4 / TCE

RUJUKAN : AASHTO T - 44 - 70 ; ASTM D - 165 - 42

- 1 Sumber Material : Pertamina Cilacap
- 2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diuji Pada : 2023

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan		
			Waktu		Suhu
1	Persiapan	Mulai	13.20	WIB	27 °C
		Selesai	13.30	WIB	27 °C
2	Penimbangan	Mulai	13.30	WIB	27 °C
3	Pelarutan	Mulai	13.40	WIB	27 °C
4	Penyaringan	Mulai	13.45	WIB	27 °C
		Selesai	14.15	WIB	27 °C
5	Di Oven	Mulai	14.15	WIB	110 °C
6	Peminangan	Mulai	14.30	WIB	27 °C

Hasil pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Benda Uji		Keterangan
		1	2	
1	Berat erlen meyer kosong	63,510 gr	63,590 gr	
2	Berat erlen meyer kosong + Aspal	65,220 gr	65,440 gr	
3	Berat Aspal (2 - 1)	1,710 gr	1,850 gr	
4	Berat kertas saring bersih	0,588 gr	0,580 gr	
5	Berat kertas saring bersih + mineral	0,589 gr	0,600 gr	
6	Berat mineral (5 - 4)	0,001 gr	0,020 gr	
7	Prosentase mineral (6/3x100%)	0,058 %	1,081 %	
8	Aspal yang larut (100% - 7)	99,942 %	98,919 %	
9	Rata-rata Aspal yang larut (%)	99,430		%



Dianjukan Oleh
Manajemen Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
[Signature]
Ir. Berhan Kuslan, M.Eng. I.P.M., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
[Signature]
Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

[Signature]
Raby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftpp@uii.ac.id
W. ftpp.uui.ac.id

Lampiran 6 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

RUJUKAN : AASHTO : T - 51 - 74 ; ASTM D - 113 - 69

- 1 Contoh dari : Pertamina Cilacap
- 2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diperiksa tg : 2023

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	Persiapan benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans $\pm 135^{\circ}\text{C}$
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang $\pm 28^{\circ}\text{C}$
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25°C	60 menit	suhu water bath $\pm 25^{\circ}\text{C}$
4	Pemeriksaan	Diuji daktilitas pada suhu 25°C , kecepatan 5 cm per menit	20 menit	suhu alat $\pm 25^{\circ}\text{C}$

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	165 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	165 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	165 cm	

Disiapkan Oleh
Manager laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Herlan Khotun, M.Eng., IPM., ASEAN Eng
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 7 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR

RUJUKAN : SNI 03-1969-2008

- 1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
- 2 Jenis Material : Agregat Kasar
- 3 Diuji Pada : 2023

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	1631,64	1627,16	1629,40
2	Berat benda uji dalam Air (BA) gr	1000,92	1000,24	1000,58
3	Berat benda uji dikering oven (BK) gr	1590,57	1589,13	1589,85
4	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(BJ - BA)}$	2,522	2,535	2,528
5	Berat jenis (SSD) = $\frac{BJ}{(BJ - BA)}$	2,587	2,595	2,591
6	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,697	2,699	2,698
7	Penyerapan air = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	2,582	2,393	2,488
8	Berat Jenis Efektif = $(BJ \text{ Bulk} + BJ \text{ Semu})/2$	2,610	2,617	2,613

Disahkan Oleh
Menang Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ibrahim Khasbi, M.Eng, IPM, ASHRAE Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abduh Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 1116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalireng km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.fkip@uii.ac.id
W. fkip.uii.ac.id

Lampiran 8 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

PEMERIKSAAN KELEKATAN AGREGAT TERHADAP ASPAL

- 1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
- 2 Jenis Material : Agregat Kasar
- 3 Diuji Pada : 2023

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Suhu	Waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda Uji			
	Mulai	25°C	08.00 WIB	
	Selesai	150°C	08.15 WIB	
2	Didiamkan Pada Suhu Ruang			
	Mulai	150°C	08.15 WIB	
	Selesai	25°C	09.45 WIB	
3	Perendaman benda uji			
	Mulai	25°C	09.45 WIB	
	Selesai	25°C	10.15 WIB	

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	98%	
2	Sampel 2	98%	
	Rata-rata	98%	

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Ir. Bertian Kusnari, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Katalab. Jalan Raya
Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti
Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Muli, Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalurung km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR

AASHTO T 96 - 77 ; SNI 2417 : 2008

- 1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
- 2 Jenis Material : Agregat Kasar
- 3 Diuji Pada : 2023

No	Jenis Gradasi		B		Keterangan
	Saringan		Benda Uji (gram)		
	Lolos	Tertahan	1	2	
1	72.2 mm (3")	63.5 mm (2.5")			
2	63.5 mm (2.5")	50.8 mm (2")			
3	50.8 mm (2")	37.5 mm (1.5")			
4	37.5 mm (1.5")	25.4 mm (1")			
5	25.4 mm (1")	19.0 mm (3/4")			
6	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (0.5")	2500,00		
7	12.5 mm (0.5")	9.5 mm (3/8")	2500,00		
8	9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")			
9	6.3 mm (1/4")	4.75 mm (4")			
10	4.75 mm (No.4)	2.36 mm (No.8)			
11	JUMLAH BENDA UJI (A)		5000,00	4659,00	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		4659,00	3775,00	
13	KEAUSAN $100x = \frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		6,820	18,974	
17	Rata-rata Keausan (%)		12,90		

Disahkan Oleh
Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Penceliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3206, 3201
F. (0274) 895130
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT HALUS

RUJUKAN : SNI 1970 - 2008

- 1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
- 2 Jenis Material : Agregat Kasar
- 3 Diuji Pada : 2023

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	501,85	501,05	
2	Berat Vicnometer + Air (B) gr	692,85	668,40	
3	Berat Vicnometer + Air + benda uji (BT) gr	995,24	972,01	
4	Berat benda uji kering oven (BK)	494,55	490,75	
5	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(B + 500) - BT}$	2,503	2,499	2,501
6	Berat jenis (SSD) = $\frac{500}{(B + 500) - BT}$	2,530	2,546	2,538
7	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B + BK) - BT}$	2,574	2,622	2,598
8	Penyerapan air = $\frac{(SSD - BK)}{BK} \times 100\%$	1,102	1,885	1,493
9	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,538	2,561	2,549

Dipastikan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

In. Darman Kuslani, M.Eng., IPM., ASCE, Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kaprodi Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Rohy Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 11 Pemeriksaan Sand Equivalent

PEMERIKSAAN SAND EQUIVALENT

RUJUKAN : SNI 3423-2008

- 1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
- 2 Jenis Material : Agregat Halus
- 3 Diuji Pada : 2023

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Persiapan, dan perendaman benda uji dalam larutan CaCl_2 selama ($\pm$ 10.1 menit).	Mulai	13.25	13.25
		Selesai	13.35	13.35
2	Waktu pengendapan (benda uji setelah digojok sebanyak 90x, dan di tambah larutan CaCl_2)	Mulai	13.40	13.40
		Selesai	13.55	13.55
4	Clay reading (Pembacaan Lumpur) Inchi	5,80	5,65	5,73
5	Sand reading (Pembacaan Pasir)	5,15	5,30	5,23
6	$\text{Sand Equivalent} = \frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100 \%$	88,79	93,84	91,30
7	Kandungan Lumpur = $100 - \text{SE}$	11,21	6,19	8,70

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Katalib. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



UNIVERSITAS
ISLAM
INDONESIA

**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895130
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

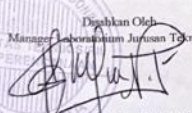
Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Debu*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER DEBU*
RUJUKAN : SNI 2441-2011

1 Jenis Material : *Filler Abu Batu*
2 Sumber Material : Clereng
3 Diuji Pada : 2023

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	20,40	23,78	
2	Berat Vicnometer + Air gr	42,91	46,97	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,51	23,19	
4	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> gr	28,50	30,36	
5	Berat <i>Filler</i> (4-1) gr	8,100	6,580	7,34
6	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> + Aquadest gr	47,810	50,970	49,39
7	Berat Aquadest (6-4) gr	19,310	20,610	19,96
8	Volume <i>Filler</i> (3-7) gr	3,200	2,580	2,89
9	Berat Jenis <i>Filler</i> = Berat/Vol (5/8)	2,531	2,550	2,54

Dipohon Oleh
Manajemen Laboratorium Jurusan Teknik Sipil



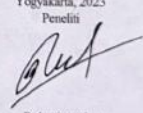
Ir. Bardono Kusnadi, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Ketua Jalan Raya



Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti



Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T: (0274) 898444 ext 3200, 3201
F: (0274) 895330
E: dekanat.fkip@uii.ac.id
W: fkip.uii.ac.id

Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Fly Ash*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER* BAUKSIT

RUFUKAN : SNI 2441-2011

- 1 Jenis Material : *Filler* Serbuk Besi
2 Sumber Material :
3 Diuji Pada : 2023

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	23,54	24,48	
2	Berat Vicnometer + Air gr	46,83	47,59	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	23,29	23,11	
4	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> gr	32,61	33,82	
5	Berat <i>Filler</i> (4-1) gr	9,070	9,340	9,21
6	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> + Aquadest gr	53,720	53,080	53,40
7	Berat Aquadest (6-4) gr	21,110	19,260	20,19
8	Volume <i>Filler</i> (3-7) gr	2,180	3,850	3,02
9	Berat Jenis <i>Filler</i> = Berat/Vol (5/8)	4,161	2,426	3,29



Dissahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
[Signature]
Ir. Berlian S. Lutfi, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kaprodi Jalan Raya
[Signature]
Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti
[Signature]
Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung E1, Blok. Negeri
Kompleks Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kuningan km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 89444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895130
E. dekanat.fkip@uii.ac.id
W. fkip@uii.ac.id

Lampiran 14 Sifat Campuran Aspal Dengan Metode Marshall

HASIL PENGUJIAN MARSHALL UNTUK MENENTUKAN KAO PADA PENGUNAAN ASPAL PEN 60/70

Tanggal Pengujian : Oktober 2023
Tipe Campuran : Stone Matrix Asphalt (SMA)
Bahan Dasar : Pen 60/70

Sampel	t (mm)	a (%)	b (%)	c (gram)	d (gram)	e (gram)	f (gram)	g (mm)	h (mm)	i (mm)	j (mm)	k (mm)	l (mm)	m (mm)	n (mm)	o (mm)	p (mm)	q (mm)	r (mm)
5a	74,71	5,26	5,00	1194,04	1205,71	692,22	513,49	2,325	2,418	11,101	85,061	3,837	14,94	3,84	52	1034,03	0,7786	805,12	2,20
5b	75,41	5,26	5,00	1195,51	1208,88	689,20	519,68	2,390	2,418	10,983	84,152	4,866	15,85	4,87	54	1073,80	0,7699	826,69	2,10
5c	73,80	5,26	5,00	1194,26	1207,84	691,50	516,34	2,313	2,418	11,042	84,607	4,351	15,39	4,35	55	1093,69	0,7950	869,48	2,09
5d	74,18	5,62	5,50	1199,52	1206,03	691,99	514,04	2,314	2,402	12,254	84,911	2,833	15,09	2,83	52	1034,03	0,7879	814,69	2,12
5e	73,96	5,62	5,50	1193,26	1208,68	684,24	523,44	2,275	2,402	11,949	82,793	5,289	17,21	5,26	57	1133,46	0,7920	897,70	2,20
5f	73,20	5,62	5,50	1191,95	1208,37	687,03	521,34	2,286	2,402	12,007	83,194	4,800	16,81	4,80	58	1151,14	0,8003	929,95	2,25
6a	73,11	6,38	6,00	1197,85	1209,35	691,15	518,10	2,312	2,385	13,545	83,683	3,072	16,32	3,07	54	1073,80	0,8079	861,56	2,28
6b	73,11	6,38	6,00	1194,12	1204,56	683,56	521,70	2,312	2,385	13,545	82,993	3,044	16,32	3,07	57	1133,46	0,8417	954,07	2,25
6c	72,17	6,38	6,00	1187,29	1206,73	681,37	525,46	2,260	2,385	12,445	81,794	5,272	18,22	5,27	60	1153,11	0,8204	978,43	2,00
6d	74,72	6,95	6,50	1189,45	1200,21	677,66	522,55	2,276	2,369	14,127	81,950	3,923	18,05	3,92	57	1133,46	0,7778	882,35	3,13
6e	71,10	6,95	6,50	1185,09	1199,66	681,21	518,45	2,281	2,369	14,187	82,296	3,518	17,70	3,52	61	1213,00	0,842	1071,34	3,25
7a	71,28	7,53	7,00	1187,28	1196,26	671,67	524,59	2,263	2,353	15,127	81,047	3,826	18,95	3,83	56	1113,57	0,8348	929,61	3,45
7b	71,80	7,53	7,00	1180,69	1197,83	680,33	517,59	2,299	2,353	15,865	82,324	2,311	17,68	2,31	55	1093,69	0,8250	902,29	3,15
7c	71,33	7,53	7,00	1190,01	1199,07	674,27	524,80	2,268	2,353	15,156	81,201	3,643	18,80	3,64	53	1053,92	0,8328	877,70	3,35
								2,277					18,48	3,26				903,20	3,32



Ditandatangani
Masa Pengujian dan Taksir Sipil
R. Permana, S.T., M.T., ASEAN Eng.
NIK : 21 511 0101

Yogyakarta, Desember 2023
Peneliti
Robby Cakra380
NIK : 20 511 116

Gedung Ist. Muli, Nazir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 894444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat@uii.ac.id
W. fkip.uii.ac.id

**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Lampiran 15 Silas Campuran Aspal Dengan Metode IRS

HASIL PENGUJIAN IRS UNTUK MENENTUKAN KAO PADA PENGGUNAAN ASPAL PEN 60/70

Tanggal Pengujian : Oktober 2023
Tipe Campuran : Stone Matrix Asphalt (SMA)
Bahan Baku : Pen 60/70

Persen Aspal	Tebal Sampel (mm)				Koreksi	Archi Stability		Flow (mm)		Stability (kg)		Tebal Sampel		Angka Koreksi	
	1	2	3	rata2		Max	Kalibrasi	awal	rata2	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX
	1	2	3	rata2		42	19,89	835,18	240	691,46	71,4	73	73	0,83	0,81
5,0%	1	71,60	71,10	71,35	0,83	45	19,89	834,83	250	776,12	71,4	73	73	0,89	0,83
	2	69,50	71,00	70,25	0,87	45	19,89	834,83	250	776,12	71,4	73	73	0,89	0,83
	3	75,50	74,20	74,85	0,78	51	19,89	1014,15	380	789,34	74,6	76,2	76,2	0,78	0,76
5,5%	1	69,90	70,40	69,20	0,83	45	19,89	834,83	380	817,44	68,3	69,9	69,9	0,89	0,89
	2	70,10	67,40	68,75	0,90	46	19,89	914,72	390	817,44	66,7	68,3	68,3	0,93	0,89
	3	72,60	72,30	72,45	0,82	48	19,89	954,49	390	817,44	71,4	73	73	0,83	0,81
6,0%	1	71,40	74,60	73,00	0,80	51	19,89	1014,15	425	817,35	71,4	73	73	0,83	0,81
	2	71,30	72,20	71,75	0,83	52	19,89	1014,03	410	817,35	71,4	73	73	0,83	0,81
	3	71,60	72,30	71,95	0,82	55	19,89	1053,69	430	894,19	69,9	71,4	71,4	0,89	0,83
6,5%	1	69,70	69,30	69,50	0,89	62	19,89	1212,88	250	817,36	69,9	71,4	71,4	0,89	0,83
	2	72,60	70,60	71,60	0,82	50	19,89	994,26	240	967,55	69,9	71,4	71,4	0,89	0,83
	3	69,70	69,80	69,75	0,88	55	19,89	1093,69	260	804,27	71,4	73	73	0,83	0,81
7,0%	1	70,70	72,40	71,55	0,83	49	19,89	974,37	465	902,59	68,3	69,9	69,9	0,89	0,89
	2	70,50	70,20	70,35	0,89	51	19,89	1014,15	465	879,17	71,4	73	73	0,83	0,81
	3	71,50	73,70	72,60	0,82	54	19,89	1073,60	475						

Yogyakarta, Desember 2023

Peselidit

Mengetahui
Kahar, Jhon Ray

Dibahkan Oleh
Manajer, Koordinator Jurusan Teknik Sipil

Robb, Oetavian
NIM : 20 511 116

Mubandah, Mubandah, S.T., M.T.
NIM : 21 511 1307

Dr. Berlian, Berlian, M.Eng, I.P.M., ASEAN Eng.
NIM : 01 511 0101

Gedung 001, Blok. H-02
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 89644 ext. 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.fkip@uii.ac.id
W. fkip.uii.ac.id

**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Lampiran 16 Silat Campuran Void Course Aggregate (VCA)

PEMERIKSAAN KADAR ASPAL DARI VOID COURSE AGGREGATE (VCA)

Kadar Aspal	Benda Uji	Berat (gram)		Volume Silinder (cm ³)	V _s (gram/cm ³)	V _a (gram/cm ³)	G _{ca} (gram/m ³)	VCA _{sec} (%)	Gmb	GCA	PCA (%)	VCAMIX (%)	VCAMIX /VCA _{DR} C	Spesifikast					
		Wadah + Camp. Aspal	B. Wadah + Aspal																
5,00%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,60	40,943	2,32534	2,60	76	31,95103	0,780	OK			
	2	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,60	40,048	2,30047	2,60	76	32,62879	0,816	OK			
	3	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,60	41,689	2,31293	2,60	76	32,31417	0,775	OK			
Rata-Rata														40,893	Rata-Rata		32,31466	0,790	OK
5,50%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,60	40,943	2,33	2,60	76	31,71187	0,775	OK			
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,60	40,048	2,28	2,60	76	33,41538	0,834	OK			
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,60	41,689	2,29	2,60	76	33,09298	0,794	OK			
Rata-Rata														40,893	Rata-Rata		32,74008	0,801	
6,00%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,60	41,075	2,31201	2,60	76	32,49266	0,791	OK			
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,60	40,182	2,2911	2,60	76	33,10315	0,824	OK			
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,60	41,820	2,25952	2,60	76	34,02502	0,814	OK			
Rata-Rata														41,025	Rata-Rata		33,20694	0,809	OK
6,50%	1																		
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,60	40,048	2,276	2,597	76,000	33,388	0,834	OK			
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,60	41,689	2,286	2,597	76,000	33,107	0,794	OK			
Rata-Rata														40,868	Rata-Rata		33,24758	0,814	OK
7,00%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,60	40,943	2,2633	2,60	76	33,76801	0,825	OK			
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,60	40,048	2,2989	2,60	76	32,72431	0,817	OK			
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,60	41,689	2,2675	2,60	76	33,64228	0,807	OK			
Rata-Rata														40,893	Rata-Rata		33,3782	0,816	OK

Yogyakarta, 2023

Peneliti

Mengetahui

Kalib, Julian Rayn

Disetujui Oleh

Muhammad Abdul Huda, S.T., M.L.

NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023

Peneliti

Muhammad Abdul Huda, S.T., M.L.

NIK : 21 511 1307



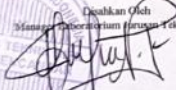
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 17 Sifat Campuran Draindown

PENGUJIAN DRAINDOWN

Kadar Aspal (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
5,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1400,52	1529,21	1529,28
	2	Berat Benda Uji	1163,40	1199,83	1199,18
	3	Berat Awal Piring Penampung	237,12	329,38	340,10
	4	Berat Akhir Piring Penampung	237,76	329,98	340,87
	5	Draindown	0,055%	0,05%	0,06%
	6	Rata-Rata Draindown		0,06	
5,5%	1	Berat Piring + Benda Uji	1458,72	1346,76	1541,41
	2	Berat Benda Uji	1166,19	1154,66	1203,99
	3	Berat Awal Piring Penampung	292,53	192,10	337,42
	4	Berat Akhir Piring Penampung	293,43	192,98	338,37
	5	Draindown	0,077%	0,08%	0,08%
	6	Rata-Rata Draindown		0,077	
6,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1518,00	1533,63	1140,69
	2	Berat Benda Uji	1188,89	1199,84	855,12
	3	Berat Awal Piring Penampung	329,11	333,79	285,37
	4	Berat Akhir Piring Penampung	330,16	334,98	286,42
	5	Draindown	0,09%	0,10%	0,10%
	6	Rata-Rata Draindown		0,096	
6,5%	1	Berat Piring + Benda Uji	1523,00	1142,78	1530,62
	2	Berat Benda Uji	1187,40	855,36	1198,82
	3	Berat Awal Piring Penampung	335,60	287,42	331,80
	4	Berat Akhir Piring Penampung	336,97	288,53	332,98
	5	Draindown	0,12%	0,13%	0,10%
	6	Rata-Rata Draindown		0,115	
7,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1537,38	1401,75	1449,66
	2	Berat Benda Uji	1204,33	1164,64	1163,34
	3	Berat Awal Piring Penampung	333,05	237,11	286,32
	4	Berat Akhir Piring Penampung	334,78	238,74	287,57
	5	Draindown	0,14%	0,14%	0,11%
	6	Rata-Rata Draindown		0,130	

Disahkan Oleh
Mansur, Sekretaris Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bertha Kusnanti, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalah, Jaiin Rasy

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Robby Octavian
NIM : 20 511 1116



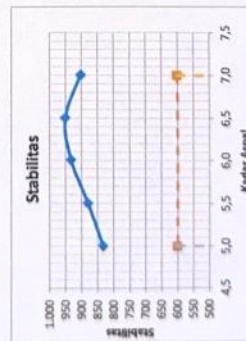
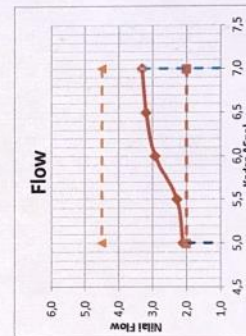
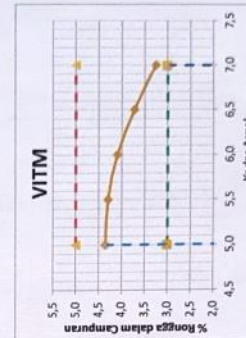
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Nadjir
Kampus Tropic University Islam Indonesia
Jl. Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 896444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat@uii.ac.id
W. i@uii.ac.id

Lampiran 18 Rekapitulasi Pehitungan KAO

REKAPITULASI PERHITUNGAN KAO

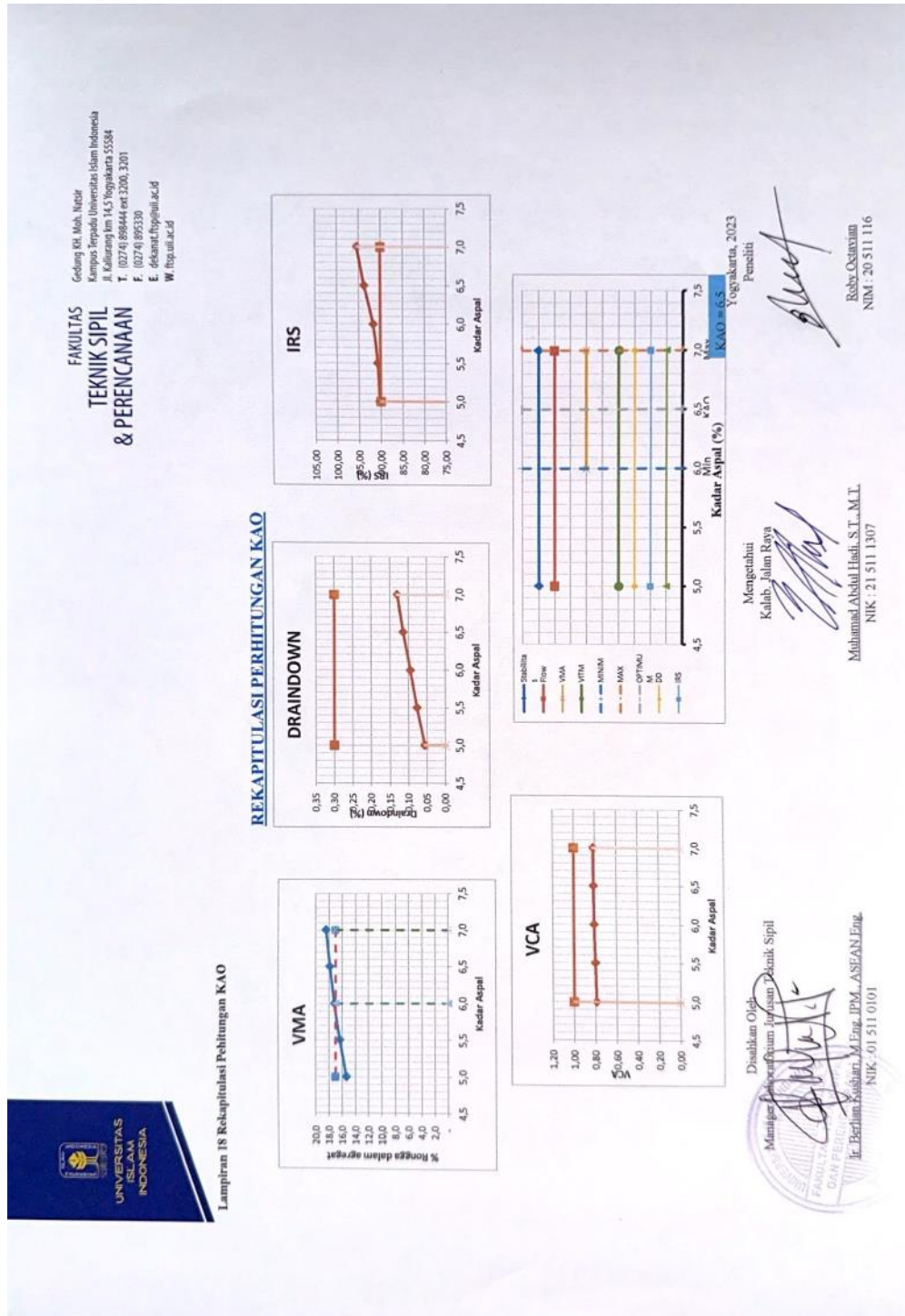
SPESIFIKASI Stone Matrix Asphalt (SMA)	Kadar Aspal (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	Flow (mm)	VITM (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)	Draindown (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	VCA
	5	833.76	2.12	4.35	15.39	2.313	0.06	752.31	90.23	0.790
	5.5	880.78	2.28	4.30	16.37	2.298	0.08	798.71	90.68	0.801
	6	933.49	2.93	4.10	17.20	2.288	0.10	856.12	91.71	0.809
	6.5	951.85	3.20	3.72	17.88	2.281	0.11	892.46	93.76	0.814
	7	903.20	3.32	3.26	18.48	2.277	0.13	862.01	95.44	0.816
BINA MARGA 2018		> 6000	2-4.5	3 - 5	> 17		<0.3	> 6000	>90	<1

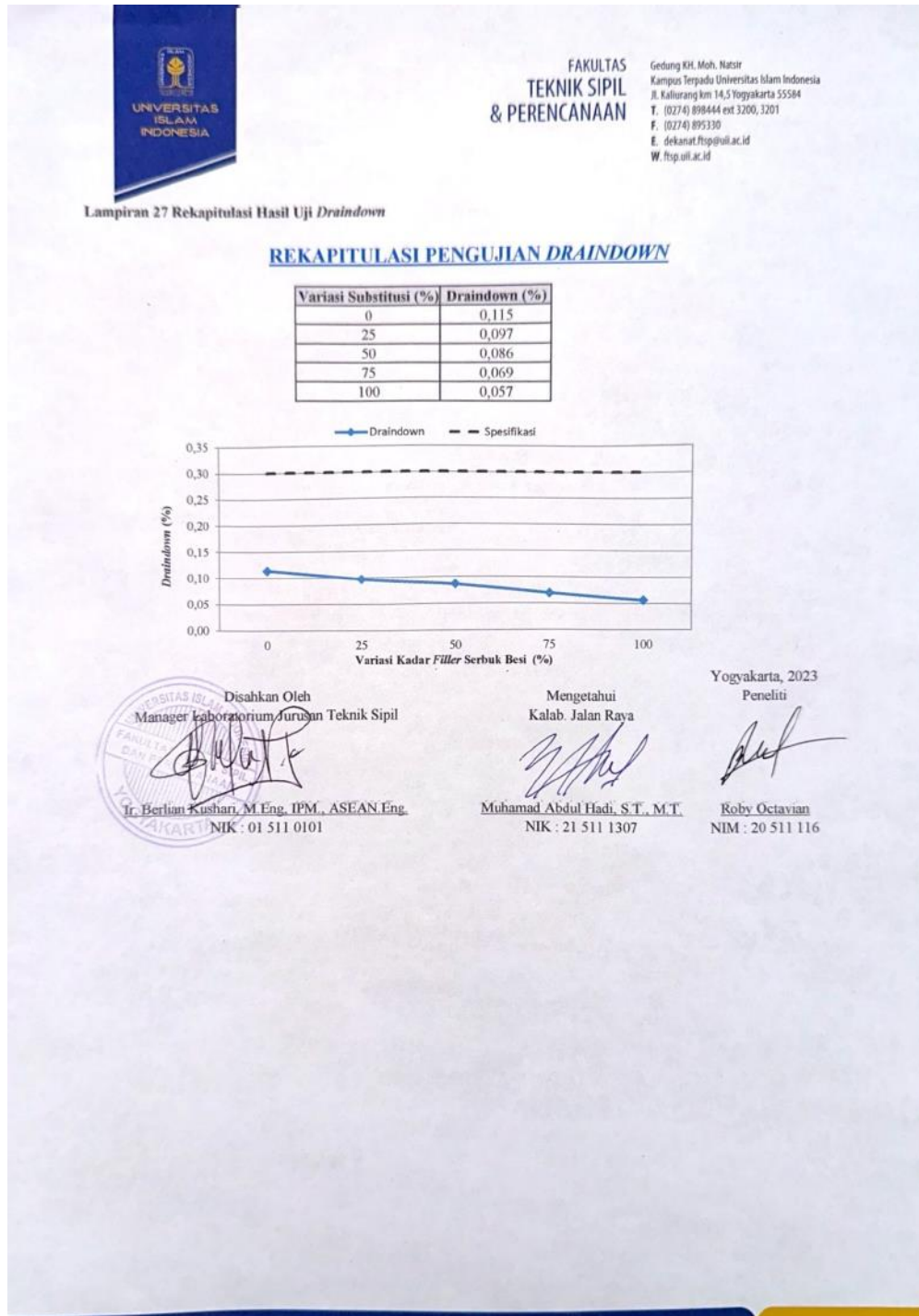


Ditahkkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Jl. Berlian Kuslani, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti
Roby Octavian
NIM : 20 511 116







FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

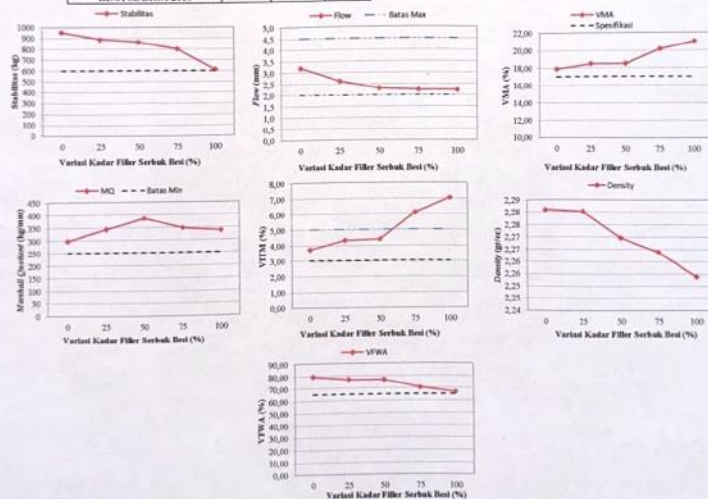
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.fsp@uii.ac.id
W. fsp.uii.ac.id

Lampiran 20 Rekapitulasi Sifat Campuran Metode Marshall

REKAP HASIL PENGUJIAN MARSHALL DAN IRS

SPEKIFIKASI Stone Matrix Asphalt (SMA)	Isar Substitusi (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (g/mm)	VTIM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
	0	951,85	3,20	297,19	3,72	79,22	17,88	2,28
	25	887,82	2,63	342,13	4,31	76,78	18,47	2,28
	50	862,39	2,30	384,63	4,38	76,47	18,47	2,27
	75	709,35	2,23	347,27	6,09	70,24	20,14	2,26
	100	611,08	2,22	336,70	7,04	66,58	21,03	2,25
BINA MARGA 2018		> 600	2-4,5	>250	3 - 5	>65	> 17	

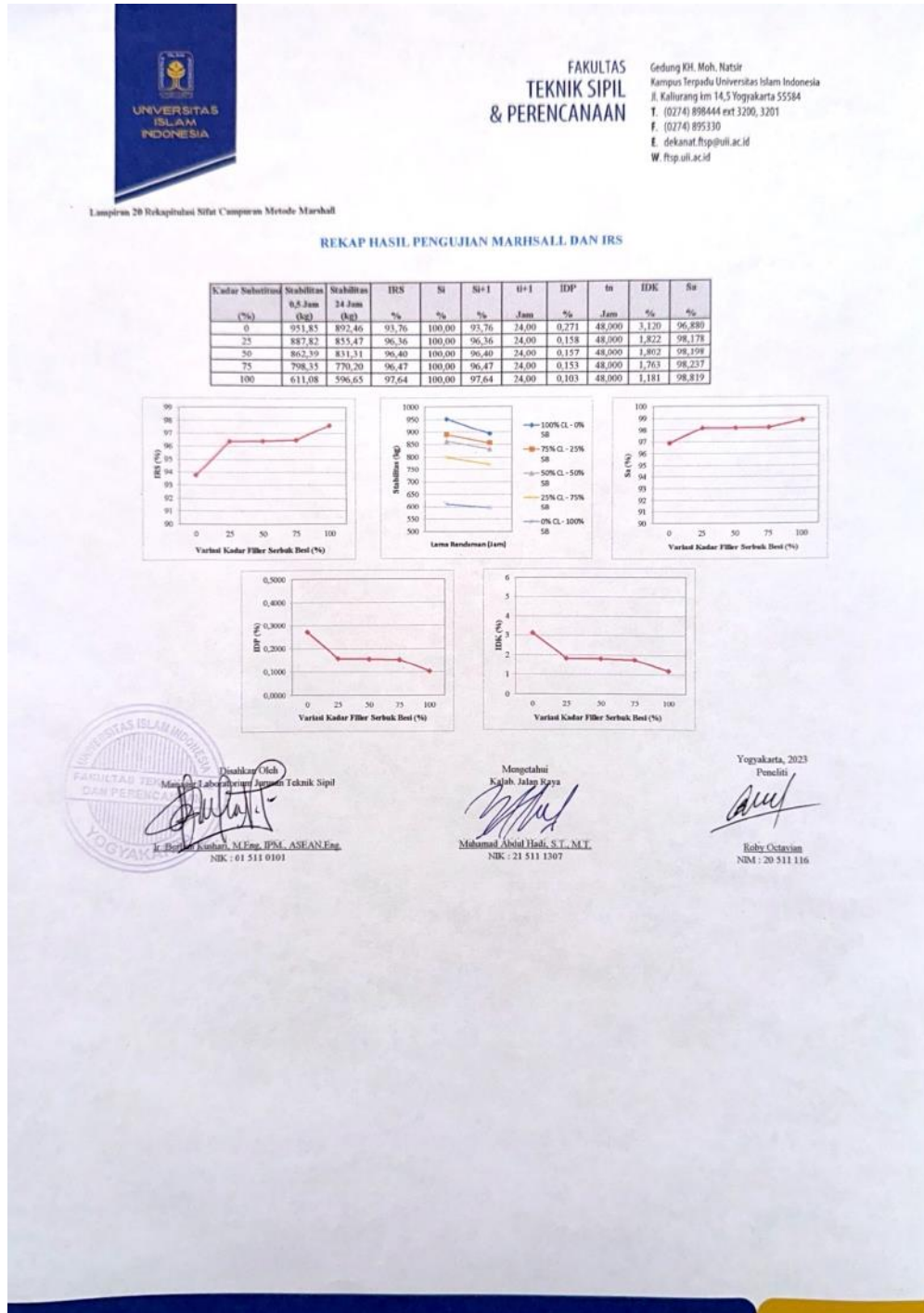
SPEKIFIKASI Stone Matrix Asphalt (SMA)	Isar Substitusi (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)
	0	892,46	2,50
	25	855,47	2,60
	50	851,31	3,03
	75	770,20	3,17
	100	596,65	3,40
BINA MARGA 2018		> 600	2-4,5



Dibuatkan Oleh
Murni Nur Rizkiyanti, S.T., M.Eng., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengotahai
Kahlo, Jalan Raya
Muhammad Abdul Hasi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti
Rohy Octavian
NIK : 20 511 116





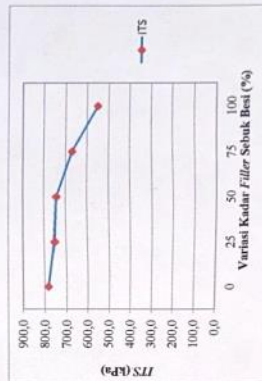
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung RII. Moh. Matar
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 894444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.fkip@uii.ac.id
W. fkip.uii.ac.id

Lampiran 23 Rekapitulasi Sifat Campuran Aspal Dengan Metode ITS dan TSR

REKAPITULASI PENGUJIAN ITS DAN TSR

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	ITS	ITS 24 Jam	TSR (%)
0		783,813	774,447	98,805
25		753,340	752,471	99,885
50	6,5	743,910	743,612	99,960
75		671,149	668,636	99,626
100		551,036	547,978	99,445



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Yogyakarta, Desember 2023

Peneliti

Ir. Berlim Kuehni, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaluarang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 896444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 24 Hasil Uji Cantabro Loss

HASIL PENGUJIAN CANTABRO LOSS

Substitusi	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi	1175,15	1179,00	1180,51
	2	Berat Sesudah Abrasi	991,59	945,50	946,58
	3	Persentase Kehilangan Berat	15,62	19,80	19,82
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		18,41	
25%	1	Berat Sebelum Abrasi	1188,84	1191,00	1185,23
	2	Berat Sesudah Abrasi	1026,08	1074,08	1018,58
	3	Persentase Kehilangan Berat	13,69	9,82	14,06
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		12,52	
50%	1	Berat Sebelum Abrasi	1183,21	1191,00	1185,56
	2	Berat Sesudah Abrasi	1054,66	1058,74	1057,77
	3	Persentase Kehilangan Berat	10,86	11,10	10,78
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		10,92	
75%	1	Berat Sebelum Abrasi	1207,65	1196,28	1201,45
	2	Berat Sesudah Abrasi	1090,32	1060,87	1070,12
	3	Persentase Kehilangan Berat	9,72	11,32	10,93
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		10,66	
100%	1	Berat Sebelum Abrasi	1170,26	1176,32	1182,23
	2	Berat Sesudah Abrasi	1057,71	1056,21	1065,35
	3	Persentase Kehilangan Berat	9,62	10,21	9,89
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		9,90	

Disiapkan Oleh
Manager Laboratorium Jembatan Teknik Sipil

Ir. Hartono Kurniawan, M.Eng., I.P.M., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kaluh. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



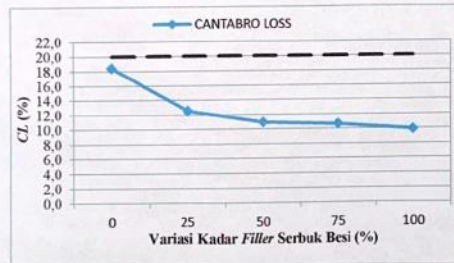
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 25 Rekapitulasi Hasil Uji Cantabro Loss

REKAPITULASI CANTABRO LOSS

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL
0	6,5	18,41
25		12,52
50		10,92
75		10,66
100		9,90



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

[Signature]

Ir. Berlian Kushari, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

[Signature]

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

[Signature]

Roby Octavian
NIM : 20 511 116



**UNIVERSITAS
ISLAM
INDONESIA**

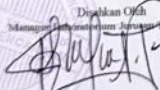
**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Gedung KH. Moh. Hatta
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T: (0274) 898444 ext 3200, 3201
F: (0274) 895330
E: dekanat.fkip@uii.ac.id
W: fkip.uii.ac.id

Lampiran 26 Hasil Uji Draindown

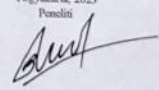
PENGUJIAN DRAINDOWN

Kultur Substitusi (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0,00%	1	Berat Piring + Benda Uji	1523,00	1142,78	1530,62
	2	Berat Benda Uji	1187,40	855,36	1198,82
	3	Berat Awal Piring Penampung	335,60	287,42	331,80
	4	Berat Akhir Piring Penampung	336,97	288,53	332,98
	5	Draindown	0,12%	0,13%	0,10%
	6	Rata-Rata Draindown		0,11%	
25,00%	1	Berat Piring + Benda Uji	1531,50	1522,41	1543,72
	2	Berat Benda Uji	1184,50	1187,21	1201,52
	3	Berat Awal Piring Penampung	347,00	335,20	342,20
	4	Berat Akhir Piring Penampung	348,15	336,25	343,47
	5	Draindown	0,10%	0,09%	0,11%
	6	Rata-Rata Draindown		0,10%	
50,00%	1	Berat Piring + Benda Uji	1446,83	1347,83	1542,34
	2	Berat Benda Uji	1163,30	1153,43	1204,81
	3	Berat Awal Piring Penampung	283,53	194,40	337,53
	4	Berat Akhir Piring Penampung	284,43	195,43	338,62
	5	Draindown	0,08%	0,09%	0,09%
	6	Rata-Rata Draindown		0,09%	
75,00%	1	Berat Piring + Benda Uji	1349,97	1545,00	1139,86
	2	Berat Benda Uji	1157,43	1213,58	855,74
	3	Berat Awal Piring Penampung	192,54	331,42	284,12
	4	Berat Akhir Piring Penampung	193,31	332,21	284,77
	5	Draindown	0,07%	0,07%	0,08%
	6	Rata-Rata Draindown		0,07%	
100,00%	1	Berat Piring + Benda Uji	1403,32	1531,26	1529,43
	2	Berat Benda Uji	1164,29	1199,77	1189,93
	3	Berat Awal Piring Penampung	239,03	331,49	339,50
	4	Berat Akhir Piring Penampung	239,63	332,20	340,20
	5	Draindown	0,05%	0,06%	0,06%
	6	Rata-Rata Draindown		0,06%	

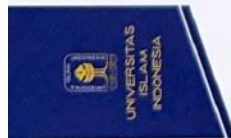
Disahkan Oleh
Menteri Pendidikan dan Kebudayaan

Ir. Berlin Kusnuri, M.Eng., I.P.M., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kadep Teknik Sipil

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116

Form-005_Certifikat Loss Bess.xlsx(2)



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung R2, Muli, Retor
Kampus Pripada Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalitang km 14,5 Yogyakarta 5534
T. (0274) 894444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.fkip@uii.ac.id
W. fkip.uii.ac.id

Lampiran 28 Hasil Pengujian Void Course Aggregate (VCA)

PEMERIKSAAN VOID COURSE AGGREGATE (VCA)

Kadar Aspal	Benda Uji	Wadah + Camp + Akr	Berat (gram)	Volume Silinder (cm ³)	V (cm ³)	γ_s (gram/cm ³)	γ_w (gram/cm ³)	G_{CA} (gram/cm ³)	VCAMIX (%)	Gmb	GCA	PCA (%)	VCAMIX (%)	VCAMIX /VCADR C	Spesifikasi
0,00	1	7959,26	3572,60	6390,00	2868,48	2924,35	1,55	1,00	2,60	40,05	2,38	2,60	33,39	0,83	OK
	2	7902,99	3478,20	6400,10	2868,48	2929,11	1,51	1,00	2,60	41,69	2,29	2,60	33,11	0,79	OK
	3	7902,99	3478,20	6400,10	2868,48	2929,11	1,51	1,00	2,60	41,69	2,29	2,60	33,11	0,79	OK
		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata	
25,00%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,59	40,723	2,36	2,59	33,6713399	0,83	OK
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,59	39,025	2,38	2,59	32,895822	0,83	OK
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,59	41,473	2,25	2,59	33,969002	0,82	OK
		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata	
50,00%	1	7937,4	3476,5	6390	2868,5	2920,7	1,527	0,9975	2,60	41,176	2,26	2,60	34,01	0,83	OK
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2829,4	1,550	0,9975	2,60	40,788	2,26	2,60	34,01	0,84	OK
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,60	41,820	2,25988	2,60	34,01465	0,81	OK
		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata	
75,00%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,62	41,422	2,32	2,62	32,66	0,79	OK
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,62	40,534	2,25	2,62	34,81	0,86	OK
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,62	42,163	2,23	2,62	35,39	0,84	OK
		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata	
100,00%	1	7937,4	3476,5	6385	2868,5	2915,7	1,530	0,9975	2,63	41,765	2,20618	2,63	36,337469	0,87	OK
	2	7959,26	3572,6	6390	2868,5	2824,3	1,553	0,9975	2,63	40,883	2,20618	2,63	36,337469	0,89	OK
	3	7902,99	3478,2	6400,1	2868,5	2929,1	1,511	0,9975	2,63	42,502	2,20618	2,63	36,337469	0,85	OK
		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata		Rata-Rata	

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Mengetahui
Kalih, Iman Royo

Diajukan Oleh
Manager Laboratorium Teknik Sipil

Muhammad Abdul Hasi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Robo Octavian
NIM : 20 511 116



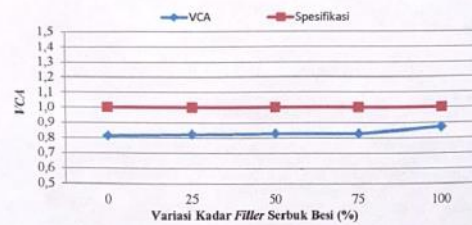
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kalurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 29 Rekapitulasi Hasil Pengujian Void Course Aggregate (VCA)

REKAPITULASI PENGUJIAN VCA

Variasi Substitusi(%)	VCAmix	VCAdrc	VCAmix/VCAdrc	Spesifikasi
0	33,25	40,87	0,814	OK
25	33,51	40,67	0,824	OK
50	34,01	41,09	0,828	OK
75	34,29	41,37	0,829	OK
100	36,34	41,72	0,871	OK



Variasi Substitusi(%)	VCAmix				
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Beritan Kushari, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Akholi Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2023
Peneliti

Roby Octavian
NIM : 20 511 116