

## **TUGAS AKHIR**

# **PENGARUH METODE PENCAMPURAN DUA TAHAP TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT* DENGAN BAHAN IKAT ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* (*EFFECTS OF TWO STEPS MIXING METHODS TO CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT WITH ASPHALT PEN 60/70 AND ASPHALT CRUMB RUBBER*)**

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



**Muhammad Irfan Hidayat  
14511320**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
2021**

## TUGAS AKHIR

# **PENGARUH METODE PENCAMPURAN DUA TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT* DENGAN BAHAN IKAT ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* (*EFFECTS OF TWO STEPS MIXING METHODS TO CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT WITH ASPHALT PEN 60/70 AND ASPHALT CRUMB RUBBER*)**

Disusun Oleh:



**Pembimbing**

Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.  
NIK: 955110103

**Penguji I**

Rizki Budi Utomo, S.T., M.T.  
NIK: 045110406

**Penguji II**

Ir. Akhmad Marzuko, M.T.  
NIK: 885110107

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil

Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.  
NIK: 885110101

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk memenuhi salah satu persyaratan pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia seluruhnya 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 dikemudian 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, 02 Maret 2021

Yang membuat pernyataan



Muhammad Irfan Hidayat

(14511320)

## KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Wr. Wb

Syukur Alhamdulillah, penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat hidayah serta inayah-nya kepada kita semua. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW, yang telah membawa manusia dari alam kegelapan menuju alam yang terang benderang dengan ilmu pengetahuan. Dengan rahmat, hidayah serta inayah dari Allah SWT penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul ***PENGARUH METODE PENCAMPURAN DUA TAHAP TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN STONE MATRIX ASPHALT DENGAN BAHAN IKAT ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL CRUMB RUBBER.***

Sejalan dengan proses pelaksanaan dan penulisan tugas akhir ini, tentu saja penulis mendapatkan begitu banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik itu secara moral dan materil, langsung maupun tidak langsung yang akhirnya menghantarkan penulis untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Untuk mengenang jasa tersebut penulis menghaturkan ucapan terima kasih yang ikhlas dan tulus kepada :

1. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D. Selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia sekaligus sebagai dosen pembimbing yang tetap memberikan arahan dan bimbingannya di tengah kesibukannya yang sangat padat.
2. Bapak Ir. Subarkah, MT., Selaku Kepala Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Rizki Budi Utomo, S.T., M.T., Selaku dosen penguji pertama yang senantiasa memberikan masukan dan bimbingannya untuk tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Akhmad Marzuko, M.T. Selaku dosen penguji kedua yang senantiasa memberikan masukan dan bimbingannya untuk tugas akhir ini.

5. Bapak Ir. Corry Ya'cub, M.T. Selaku dosen penguji sidang yang senantiasa memberikan masukan dan bimbingannya untuk tugas akhir ini.
6. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T. Selaku ketua jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.
7. Ibu Wiwik Saptorini, selaku staff administrasi Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
8. Bapak Sukanto HM dan Bapak Pranoto, selaku laboran Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Yang telah banyak membantu selama proses penelitian.
9. Semua dosen yang telah membekali ilmu pengetahuan selama penulis menempuh jenjang perkuliahan di UII.
10. Bapak Irwan, selaku Manager PT. Bintang Jaja Pertamina Cilacap. Yang telah sangat membantu memberikan aspal *Crumb Rubber* untuk penelitian ini. Semoga kebaikan bapak terbalas oleh Allah SWT.
11. Kedua orang tua: Bapak dan Ibu (H.Yusuf Hidayat & Hj.Ade Iis Barniasari) tercinta atas kasih sayang, restu, dan do'a yang selalu teriring tanpa henti, nasehat dan dukungan, serta pengorbanan waktu dan tetesan keringat yang turecurahkan untuk membiayai kami anak anaknya demi keberhasilan yang lebih baik dengan bekal ilmu pengetahuan. Terima kasih Bapak & Ibu. Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk kalian.
12. Kekasihku Andi Apri Sulistya Putri, S.M, terima kasih atas bantuan, dukungan, motivasi dan do'a yang tulus. Maaf kesetiaan dan pengorbanan yang engkau berikan selama ini belum terbalaskan.
13. Adikku Muhammad Raihan Hidayat, terima kasih atas do'a dan motivasi yang telah kamu berikan.
14. Sahabat seperjuanganku M. Falah Amaludin yang sangat sabar dan tabah dalam menghadapi permasalahan demi tercapainya gelar Sarjana, terima kasih atas ilmu, waktu, dan bantuannya.
15. Partner bimbingan Alan Tri Wahyudi, yang telah membantu selama proses penelitian.

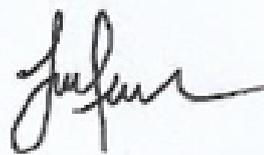
16. Bosanova, Adi Handoyo. Squad kos Muhtarom. Tempatku berbagi cerita dan satu rasa. Terimakasih atas bantuan, kenang-kenangan, dan persahabatan kita. Semoga persahabatan kita tidak hanya di kos.
17. Adik tingkatku Abdul Hadi. Terimakasih atas bantuan, ilmu, dan bantuannya demi tercapainya gelar sarjana.
18. Kepada semua pihak yang turut membantu kesuksesan penulis walaupun belum disebutkan disini tetapi kan selalu kuingat dan kukenang.

Penulis menyadari bahwa karya yang telah dihasilkan ini tidak luput dari kesalahan dan kekurangan, karena itu perkenankanlah permohonan maaf dari penulis. Akhirnya, penulis berharap karya ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan baik, dikalangan pendidikan maupun dikalangan masyarakat umum, sehingga dikemudian hari hasil dari penulis ini dapat lebih dikembangkan ke arah yang lebih baik.

Wabillahitaufiq Walhidayah  
Wassalamu'alaikum Wr.Wb

Yogyakarta, 02 Maret 2021

Penulis



Muhammad Irfan Hidayat  
14511320

## DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	i
TUGAS AKHIR	ii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xxi
ABSTRAK	xxiii
<i>ABSTRACT</i>	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II STUDI PUSTAKA	7
2.1 Kinerja Perkerasan Jalan dengan Metode Pencampuran Dua Tahap	7
2.2 Kinerja Perkerasan Jalan dengan Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>	8
2.3 Kinerja Perkerasan Jalan dengan Bahan Ikat Aspal <i>Crumb Rubber</i>	8
2.4 Penelitian Terdahulu	8
2.5 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan	10
BAB III LANDASAN TEORI	11
3.1 Struktur Perkerasan Jalan	11
3.2 Perkerasan Lentur ( <i>Flexible Pavment</i> )	11
3.2.1 Macam-macam Lapisan Perkerasan Lentur	12
3.3 Material Penyusun Perkerasan Lentur Jalan	14

3.3.1	Aspal	14
3.3.2	Agregat	16
3.3.3	Gradasi Agregat	18
3.3.4	Bahan Aditif	18
3.4	Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>	19
3.5	Metode Pencampuran Dua Tahap	21
3.6	Karakteristik Lapis Perkerasan Lentur	22
3.6.1	Stabilitas ( <i>Stability</i> )	22
3.6.2	Keawetan ( <i>Durability</i> )	23
3.6.3	Kelenturan ( <i>Flexibility</i> )	24
3.6.4	Ketahanan Lelah ( <i>Fatigue Resistance</i> )	24
3.6.5	Tahanan Geser ( <i>Skid Resistance</i> )	24
3.6.6	Kedap Air ( <i>Impermeability</i> )	25
3.6.7	Kemudahan Pelaksanaan ( <i>Workability</i> )	25
3.7	Perhitungan Sifat Volumetrik Campuran Beton Aspal	25
3.7.1	Berat jenis bulk beton aspal padat ( $G_{mb}$ )	25
3.7.2	Berat jenis bulk efektif agregat ( $G_{se}$ )	26
3.7.3	Berat jenis maksimum beton aspal yang belum dipadatkan ( $G_{mm}$ )	26
3.7.4	<i>Void in Mineral Aggregate (VMA)</i>	27
3.7.5	<i>Void in Mix (VIM)</i>	27
3.7.6	<i>Volume of Void Filled with Asphalt (VFWA)</i>	28
3.7.7	Kepadatan ( <i>Density</i> )	29
3.8	Karakteristik Pengujian <i>Marshall (Marshall Test)</i>	30
3.8.1	Perhitungan Nilai Stabilitas dan Kelelahan ( <i>Flow</i> )	30
3.8.2	Perhitungan <i>Marshall Quotient (MQ)</i>	31
3.9	Pengujian Perendaman ( <i>Immersion Test</i> )	31
3.10	Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i>	32
3.11	Pengujian <i>Tensile Strength Ratio (TSR)</i>	33
3.12	Pengujian <i>Cantabro (Cantabro Test)</i>	33
3.13	Perhitungan Indeks Penetrasi ( <i>PI</i> )	34

3.14	Perhitungan Modulus Kekakuan	35
BAB IV METODE PENELITIAN		39
4.1	Metode Penelitian	39
4.2	Metode Pengambilan Sampel	39
4.3	Metode Pengambilan Data	39
4.4	Tahapan Penelitian	40
4.4.1	Persiapan dan Pemeriksaan Material	40
4.4.2	Persiapan Alat	42
4.4.3	Perencanaan Campuran ( <i>Mix Design</i> )	44
4.4.4	Pembuatan Campuran Sampel	50
4.4.5	Pengujian <i>Marshall Test</i>	53
4.4.6	Pengujian <i>Immersion Test</i>	54
4.4.7	Pengujian <i>Indiret Tensile Strength</i>	55
4.4.8	Pengujian <i>Tensile Strength Ratio</i>	55
4.4.9	Pengujian <i>Cantabro Test</i>	55
4.5	Analisis Data	56
4.6	Bagan Alir Penelitian	60
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		62
5.1	Hasil Penelitian	62
5.1.1	Hasil Pengujian Karakteristik Agregat dan <i>Filler</i>	62
5.1.2	Hasil Pengujian Karakteristik Aspal	63
5.1.3	Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO)	64
5.1.4	Hasil Pengujian Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm pada Kadar Aspal Optimum (KAO)	67
5.1.5	Hasil Perhitungan Nilai Indeks Penetrasi ( <i>PI</i> )	69
5.1.6	Hasil Perhitungan Nilai Modulus Kekakuan Aspal ( <i>S<sub>bit</sub></i> ) dan Nilai Modulus Kekakuan Campuran ( <i>S<sub>mix</sub></i> )	70
5.1.7	Hasil Analisis Statik <i>T-Test</i>	79
5.1.8	Hasil Analisis Statik <i>Anova</i>	80

5.2	Pembahasan	81
5.2.1	Karakteristik Agregat Kasar	81
5.2.2	Karakteristik Agregat Halus	82
5.2.3	Karakteristik Aspal	83
5.2.4	Tinjauan Karakteristik Volumetrik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm	85
5.2.5	Tinjauan Karakteristik <i>Marshall</i> Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO)	86
5.2.6	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Marshall</i> Pada Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	95
5.2.7	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Immersion Test</i> pada Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	105
5.2.8	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i> pada Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	108
5.2.9	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Tensile Strength Ratio (TSR)</i> pada Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	110
5.2.10	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Cantabro Loss</i> pada Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	112

5.2.11 Tinjauan Umum Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik Campuran SMA 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	114
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	116
6.1 Kesimpulan	116
6.2 Saran	118
DAFTAR PUSTAKA	120
LAMPIRAN	1244



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu	8
Tabel 3.1	Persyaratan Aspal Padat	16
Tabel 3.2	Persyaratan Agregat Kasar	17
Tabel 3.3	Persyaratan Agregat Halus	17
Tabel 3.4	Gradasi Agregat Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> 12,5 mm	20
Tabel 3.5	Ketentuan Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i>	20
Tabel 4.1	Rencana Gradasi Agregat Kasar <i>Stone Matrix Asphalt</i>	45
Tabel 4.2	Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5,5 %	46
Tabel 4.3	Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6 %	47
Tabel 4.4	Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6,5 %	47
Tabel 4.5	Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7 %	48
Tabel 4.6	Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7,5 %	48
Tabel 4.7	Jumlah Benda Uji Untuk memperoleh Nilai KAO	48
Tabel 4.8	Jumlah Kebutuhan Agregat Campuran Aspal Pen 60/70 dengan Kadar Aspal 6,985 %	49
Tabel 4.9	Jumlah Kebutuhan Agregat Campuran Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Kadar Aspal 6,850 %	49
Tabel 4.10	Jumlah Benda Uji Untuk Tiap Pengujian Pada KAO	50
Tabel 5.1	Hasil Pengujian Agregat Kasar	62
Tabel 5.2	Hasil Pengujian Agregat Halus	63
Tabel 5.3	Hasil Pengujian <i>Filler</i> Abu Batu Clereng	63
Tabel 5.4	Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70	63
Tabel 5.5	Hasil Pengujian Aspal <i>Crumb Rubber</i>	64
Tabel 5.6	Hasil Pengujian <i>Marshall</i> Aspal Pen 60/70 untuk Mencari KAO	65
Tabel 5.7	Hasil Pengujian <i>Marshall</i> Aspal <i>Crumb Rubber</i> untuk Mencari KAO	66
Tabel 5.8	Rekapitulasi Kadar Aspal Optimum	67

Tabel 5.9	Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70	67
Tabel 5.10	Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran dengan Bahan Ikat Aspal <i>Crumb Rubber</i>	68
Tabel 5.11	Hasil Pengujian <i>Index of Retained Strength (IRS)</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran	68
Tabel 5.12	Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran	68
Tabel 5.13	Hasil Pengujian <i>Index Tensile Strength (TSR)</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran	69
Tabel 5.14	Hasil Pengujian <i>Cantabro Test</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran	69
Tabel 5.15	Hasil Perhitungan Nilai <i>PI</i>	70
Tabel 5.16	Rekapitulasi Besaran Nilai Modulus Kekakuan <i>Bitumen (S<sub>bit</sub>)</i> pada Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	72
Tabel 5.17	Rekapitulasi Besaran Nilai Modulus Kekakuan Campuran ( <i>S<sub>mix</sub></i> ) pada Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> Menggunakan Dua Metode Pencampuran	78
Tabel 5.18	Rekapitulasi Hasil Uji Statistik <i>T-Test</i> untuk Sifat Fisik Aspal <i>Crumb Rubber</i> Terhadap Aspal Pen 60/70	79
Tabel 5.19	Rekapitulasi Hasil Uji Statistik <i>T-Test</i> untuk Pengaruh Aspal Terhadap Karakteristik <i>Marshall</i>	79
Tabel 5.20	Rekapitulasi Hasil Uji Statistik <i>T-Test</i> untuk <i>Index of Retained Strength, Indirect Tensile Strength, Cantabro, dan S<sub>mix</sub></i>	80
Tabel 5.21	Rekapitulasi Hasil Uji Statistik <i>Anova</i> Untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Marshall</i>	80
Tabel 5.22	Rekapitulasi Hasil Uji Statistik <i>Anova</i> Untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap <i>Index of Retained Strength, Indirect Tensile Strength, Tensile Strength Ratio, dan Cantabro</i>	81
Tabel 5.23	Data Hasil Pengujian Volumetrik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm</i>	86

Tabel 5.24 Perbandingan Kinerja Perkerasan Campuran SMA 12,5 mm  
Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber*

114



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Distribusi Beban Roda Perkerasan Lentur	12
Gambar 3.2	Lapisan Perkerasan Lentur	13
Gambar 3.3	Ilustrasi Proses Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap	21
Gambar 3.4	Ilustrasi <i>VMA</i> , <i>Voids</i> , dan Kadar <i>Bitumen</i> Efektif	28
Gambar 3.5	Ilustrasi Rongga Agregat yang Terisi Bitumen	29
Gambar 4.1	Rencana Gradasi Agregat Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> 12,5 mm	45
Gambar 4.2	Bagan Alir Penelitian	61
Gambar 5.1	Kadar Aspal Optimum Aspal Pen 60/70	65
Gambar 5.2	Penentuan KAO Aspal <i>Crumb Rubber</i>	66
Gambar 5.3	Grafik Nomogram Vander Poel <i>Stiffnes</i> Modulus Kekakuan <i>Bitumen (S<sub>bit</sub>)</i> Aspal Pen 60/70	71
Gambar 5.4	Grafik Nomogram Vander Poel <i>Stiffnes</i> Modulus Kekakuan <i>Bitumen (S<sub>bit</sub>)</i> Aspal <i>Crumb Rubber</i>	72
Gambar 5.5	Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( <i>S<sub>mix</sub></i> ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Konvensional	76
Gambar 5.6	Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( <i>S<sub>mix</sub></i> ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Bertahap	76
Gambar 5.7	Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( <i>S<sub>mix</sub></i> ) Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Metode Pencampuran Konvensional	77
Gambar 5.8	Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( <i>S<sub>mix</sub></i> ) Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Metode Pencampuran Bertahap	77
Gambar 5.9	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai <i>VITM</i>	87
Gambar 5.10	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai <i>VFWA</i>	88
Gambar 5.11	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai <i>VMA</i>	89
Gambar 5.12	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai <i>Density</i>	91
Gambar 5.13	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas	92

Gambar 5.14	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai <i>Flow</i>	93
Gambar 5.15	Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai <i>MQ</i>	94
Gambar 5.16	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>VITM</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	96
Gambar 5.17	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>VFWA</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	97
Gambar 5.18	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>VMA</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	99
Gambar 5.19	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Density</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	100
Gambar 5.20	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Stabilitas Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	101
Gambar 5.21	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Flow</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	103
Gambar 5.22	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>MQ</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	104
Gambar 5.23	Grafik Perbandingan antara Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Stabilitas <i>Marshall</i> 0,5 jam dan 24 jam Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	106
Gambar 5.24	Grafik Perbandingan antara Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Index of Retained Strength</i> Menggunakan Bahan Ikat aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	107

Gambar 5.25	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>ITS Uncondition</i> dan <i>ITS Condition</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	109
Gambar 5.26	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>TSR</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	111
Gambar 5.27	Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai <i>Cantabro Loss</i> Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	113



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70	125
Lampiran 2	Pemeriksaan Penetrasi Aspal <i>Crumb Rubber</i>	126
Lampiran 3	Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen60/70	127
Lampiran 4	Pemeriksaan Titik Lembek Aspal <i>Crumb Rubber</i>	127
Lampiran 5	Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70	128
Lampiran 6	Pemeriksaan Daktilitas Aspal <i>Crumb Rubber</i>	130
Lampiran 7	Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70	130
Lampiran 8	Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal <i>Crumb Rubber</i>	132
Lampiran 9	Pemeriksaan Kelarutan Aspal Pen 60/70 dalam <i>TCE</i>	132
Lampiran 10	Pemeriksaan Kelarutan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dalam <i>TCE</i>	133
Lampiran 11	Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70	134
Lampiran 12	Pemeriksaan Berat Jenis Aspal <i>Crumb Rubber</i>	136
Lampiran 13	Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar	137
Lampiran 14	Pemeriksaan Kelekatan Agregat Oleh Aspal Pen 60/70	138
Lampiran 15	Pemeriksaan Kelekatan Agregat Oleh Aspal <i>Crumb Rubber</i>	139
Lampiran 16	Pemeriksaan Keasuan Agregat ( <i>Abrasi Test</i> )	140
Lampiran 17	Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus	141
Lampiran 18	Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler</i> Clereng	142
Lampiran 19	Pemeriksaan <i>Sand Equivalent</i>	143
Lampiran 20	Tabel Pengujian <i>Marshall Test</i> dalam Mencari KAO Aspal Pen 60/70	144
Lampiran 21	Tabel Pengujian <i>Marshall Test</i> dalam Mencari KAO Aspal <i>Crumb Rubber</i>	144
Lampiran 22	Grafik Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> dalam Mencari KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	146
Lampiran 23	Grafik Hasil Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Pen 60/70	147
Lampiran 24	Grafik Hasil Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal <i>Crumb Rubber</i>	148

Lampiran 25	Tabel Pengujian <i>Marshall Test</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dengan Dua Metode Pencampuran	148
Lampiran 26	Tabel Pengujian <i>Marshall Test</i> pada KAO Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	150
Lampiran 27	Grafik Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	151
Lampiran 28	Tabel Pengujian <i>Immersion Test</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dengan Dua Metode Pencampuran	152
Lampiran 29	Tabel Pengujian <i>Immersion Test</i> pada KAO Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	153
Lampiran 30	Grafik Hasil Pengujian <i>Immersion Test</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	154
Lampiran 31	Grafik Hasil Pengujian <i>Immersion Test</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	155
Lampiran 32	Tabel Pengujian <i>ITS</i> 0,5 Jam pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	155
Lampiran 33	Tabel Pengujian <i>ITS</i> 24 Jam pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	157
Lampiran 34	Grafik Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i> 0,5 Jam dan 24 Jam pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	158
Lampiran 35	Grafik Hasil <i>Tensile Strength Ratio (TSR)</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	159
Lampiran 36	Tabel Pengujian <i>Cantabro Test</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	160
Lampiran 37	Grafik Hasil <i>Cantabro Loss</i> pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Dua Metode Pencampuran	161

Lampiran 38	Grafik Nomogram Vander Poel ( $S_{bit}$ ) Aspal Pen 60/70	162
Lampiran 39	Grafik Nomogram Vander Poel ( $S_{bit}$ ) Aspal <i>Crumb Rubber</i>	163
Lampiran 40	Grafik Nomogram <i>Stiffness</i> Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Konvensional	164
Lampiran 41	Grafik Nomogram <i>Stiffness</i> Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap	165
Lampiran 42	Grafik Nomogram <i>Stiffness</i> Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap	166
Lampiran 43	Grafik Nomogram <i>Stiffness</i> Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan Metode Pencampuran Dua Tahap	167
Lampiran 44	Hasil Pemeriksaan Viskositas Aspal <i>Crumb Rubber</i> dengan <i>Viscotester</i> Rotasi	Alat 168
Lampiran 45	Grafik Hasil Pemeriksaan Viskositas Aspal <i>Crumb Rubber</i>	169
Lampiran 46	Hasil Analisis <i>T-test</i> Pengujian Sifat Fisik Aspal Pen 60/70 Terhadap Aspal <i>Crumb Rubber</i>	170
Lampiran 47	Hasil Analisis <i>T-Test</i> Pengujian <i>Marshall</i> dengan Campuran Aspal <i>Crumb Rubber</i> Terhadap Campuran Aspal Pen 60/70	173
Lampiran 48	Hasil Analisis <i>T-Test</i> Pengujian <i>IRS, ITS, TSR, dan Cantabro</i> dengan Campuran Aspal <i>Crumb Rubber</i> Terhadap Campuran Aspal Pen 60/70	176
Lampiran 49	Hasil Analisis <i>Anova</i> untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Marshall</i>	178
Lampiran 50	Hasil Analisis <i>Anova</i> untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Immersion Test</i>	180
Lampiran 51	Hasil Analisis <i>Anova</i> untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Indirect Tensile Strenght</i>	181
Lampiran 52	Hasil Analisis <i>Anova</i> untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Tensile Strenght Ratio</i>	182
Lampiran 53	Hasil Analisis <i>Anova</i> untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik <i>Cantabro Loss</i>	183

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

<i>SMA</i>	: <i>Stone Matrix Asphalt</i>
<i>AMP</i>	: <i>Asphalt Mixing Plant</i>
<i>IRS</i>	: <i>Index of Retained Strength</i>
<i>ITS</i>	: <i>Index of Tensile Strength</i>
<i>ITS<sub>o</sub></i>	: kuat tarik tidak langsung awal
<i>ITS<sub>n</sub></i>	: kuat tarik tidak langsung dengan durasi perendaman
<i>TSR</i>	: <i>Tensile Strength Ratio</i>
<i>VMA</i>	: <i>Voids in the Mineral Aggregate</i>
<i>VITM</i>	: <i>Voids in the Mix</i>
<i>VFWA</i>	: <i>Void Filled with Asphalt</i>
<i>MQ</i>	: <i>Marshall Quetient</i>
<i>ASTM</i>	: <i>American Standart Testing and Material</i>
SNI	: Standar Nasional Indonesia
$V_{mb}$	: volume <i>bulk</i>
Gsb	: berat jenis <i>bulk</i> total agregat
$P_1, P_2, P_n$	: persen berat masing-masing agregat
$G_1, G_2, G_n$	: persen berat jenis masing-masing agregat
$G_{se}$	: berat jenis efektif total agregat
$G_{mm}$	: berat jenis maksimum campuran aspal (tanpa rongga)
$P_{mm}$	: persentase berat dari total campuran yang belum padat
$P_b$	: kadar aspal, persen berat total dari campuran
$G_b$	: berat jenis aspal
$P_s$	: kadar agregat, persen berat total dari campuran
c	: berat benda uji sebelum direndam (gr)
d	: berat benda uji jenuh air (gr)
e	: volume benda uji di dalam air (ml)
f	: volume benda uji (ml)
Bk	: berat benda uji kering oven (gr)

B	: berat piknometer berisi air (gr)
Bt	: berat piknometer berisi benda uji dan air (gr)
qs	: nilai stabilitas
p	: pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi <i>proving ring</i> ,
q	: angka koreksi benda uji
g	: berat volume benda uji / nilai <i>density</i> (gr/cc)
h	: berat jenis maksimum teoritis (gr/cc)
MSi	: stabilitas <i>Marshall</i> perendaman (24 jam) (Kg)
MSs	: stabilitas <i>Marshall</i> standar (1/2 jam) (Kg)
$\gamma_{air}$	: berat jenis air (kg/cm <sup>3</sup> )
CALi	: <i>Cantabro Abrasion Loss</i> (%)
mi1	: berat mula-mula benda uji ( <i>specimen</i> ) (gr)
mi2	: berat benda uji ( <i>specimen</i> ) setelah pengujian (gr)
$S_{bit}$	: modulus kekakuan <i>bitumen</i>
$S_{mix}$	: modulus kekakuan campuran
CR	: <i>Crumb Rubber</i>

## ABSTRAK

Karakteristik perkerasan jalan sering tidak sesuai dengan umur rencana selama masa pelayanan, sehingga menimbulkan kerusakan seperti *bleeding*, alur, retak, dan juga kerusakan jalan lainnya yang disebabkan adanya beberapa kendala dalam pemeliharaan jalan, sehingga diperlukan campuran perkerasan yang bersifat fleksibel dengan stabilitas dan durabilitas tinggi, tidak peka terhadap cuaca panas, tahan oksidasi, tahan terhadap rembesan air hujan, serta aman bagi lingkungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengurangi kerusakan jalan dan menaikkan mutu campuran beraspal dengan membandingkan teknik metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran konvensional terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

Penelitian dilakukan empat tahap. Tahap pertama yaitu pengujian sifat material yang terdiri dari pengujian agregat dan aspal. Kedua menentukan kadar aspal optimum pada campuran *SMA* 12,5 mm dengan variasi kadar aspal sebesar 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% pada masing-masing jenis aspal. Selanjutnya, membuat sampel dengan dua jenis metode pencampuran pada masing-masing jenis aspal dan melakukan uji *Marshall Test*, *Immersion Test*, *Indirect Tensile Strength*, *Tensile Strength Ratio*, dan *Cantabro*. Tahap terakhir melakukan analisis, pembahasan, dan mengambil kesimpulan dari hasil pengujian yang dilakukan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencampuran dua tahap dapat digunakan sebagai metode alternatif untuk meningkatkan mutu dan kinerja campuran *SMA* 12,5 mm bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada setiap pengujian. Dalam pengujian karakteristik *Marshall Test*, *Immersion Test*, *Indirect Tensile Strength*, dan *Tensile Strength Ratio* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai yang lebih tinggi dari penggunaan metode pencampuran konvensional, dan pada pengujian karakteristik *cantabro* penggunaan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai yang lebih rendah dari metode pencampuran konvensional. Hal ini dikarenakan pelapisan awal aspal dengan agregat pada metode pencampuran dua tahap dapat meningkatkan stabilitas, durabilitas, tahan terhadap geser, dan kedap air. Penggunaan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *SMA* 12,5 mm menghasilkan nilai yang lebih tinggi dan lebih baik pada masing-masing jenis pengujian dibandingkan dengan campuran *SMA* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70. Hal ini dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki karakteristik teknis yang dapat meningkatkan kinerja campuran aspal antara lain: meningkatkan kelekatan, mengurangi terjadinya deformasi, dan meningkatkan ketahanan terhadap retak pada campuran aspal.

**Kata Kunci** : Metode Pencampuran Dua Tahap, Aspal *Crumb Rubber*, *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm, Kinerja Campuran Beraspal.

## **ABSTRACT**

*The characteristics of the road pavement usually do not match the planned age during the service period, causing damage such as bleeding, grooves, cracks, and also other road damage caused by several obstacles in road maintenance, so a pavement mixture that is flexible with high stability and durability is needed, insensitive to hot weather, resistant to oxidation, resistant to seepage of rain water, and safe for the environment. This purpose of this study was to reduce road damage and improve the quality of the asphalt mixture by comparing the two steps mixing method and conventional mixing methods to the characteristics mixture of the Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm using asphalt Pen 60/70 and asphalt Crumb Rubber.*

*The research is conducted by four stages. The first stage was testing the properties of the material which consisted of testing the aggregate and asphalt. Second, to determine the optimum asphalt content in the mixture SMA 12.5 mm with variations in the asphalt content of 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, and 7,5% for each type of asphalt. Next, make a sample with two types of mixing methods for each type of asphalt and perform the Marshall Test, Immersion Test, Indirect Tensile Strength, Tensile Strength Ratio, and Cantabro. The last stage is to analyze, discuss, and draw conclusions from the results of the test carried out.*

*The results showed that the two steps mixing method could be used as an alternative method to improve the quality and performance of the mixture SMA 12,5 mm of asphalt Pen 60/70 and asphalt Crumb Rubber in each test. In testing the characteristics of the Marshall Test, Immersion Test, Indirect Tensile Strength, and Tensile Strength Ratio using the two steps mixing method produced higher values than the use of conventional mixing methods, and in testing the characteristics cantabro using the two steps mixing method resulted in a lower value than conventional mixing method. This is because the pre-coating of asphalt with aggregates in the two steps mixing method can improve stability, durability, resistance to shear, and water resistance. The use of asphalt Crumb Rubber in the mixture SMA 12,5 mm resulted in higher and better values for each type of test compared to the mixture SMA 12,5 mm used asphalt Pen 60/70. This is because the asphalt Crumb Rubber has technical characteristics that can improve the performance of the asphalt mixture, including: increasing adhesiveness, reducing deformation, and increasing crack resistance in the asphalt mixture.*

**Keywords** : *Two Steps Mixing Methods, Asphalt Crumb Rubber, Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm, Performance of mixture.*

# **BAB I PENDAHULUAN**

## **1.1 Latar Belakang**

Transportasi merupakan urat nadi politik, ekonomi, sosial budaya, dan pertahanan keamanan nasional, serta berperan penting dalam pertahanan negara. Diperlukan sistem transportasi yang andal dengan daya dukung struktural yang tinggi serta kemampuan jaringan yang efektif dan efisien untuk mendukung pembangunan daerah, pembangunan ekonomi, mobilitas personel, barang dan jasa, sehingga dapat meningkatkan daya saing nasional. Kementerian Perhubungan (2019) menyatakan infrastruktur jalan raya di Indonesia memainkan peran penting dalam transportasi nasional, melayani sekitar 92% angkutan penumpang dan 90% angkutan barang melalui jaringan jalan yang ada.

Kondisi jalan di Indonesia keadaannya sangat bervariasi, dari keadaan baik, sedang, rusak ringan, rusak berat dan tidak tembus atau tidak dapat dilalui. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2019), panjang jalan nasional di Indonesia pada tahun 2019 adalah 543.310 km. Jumlah tersebut terdiri dari 47.017 km merupakan jalan nasional (kewenangan pemerintah pusat), 55.416 km di bawah kewenangan pemerintah provinsi, dan 435.405 km merupakan kewenangan pemerintah kabupaten/kota. Berdasarkan kondisi jalan, sepanjang 180.244 km atau 33.5% jalan di Indonesia dalam keadaan rusak. Dimana 86.605 km dalam keadaan rusak ditambah 93.619 km rusak berat. Sedangkan jalan yang dalam keadaan sedang mencapai 115.127 km atau 21,4% dan yang dalam keadaan baik 242.487 km atau 45%.

Beban lalu lintas yang tinggi menjadi masalah terhadap perkerasan jalan dan iklim tropis yang berakibat pada tingginya temperatur menyebabkan terjadinya proses penuaan dan sebagian struktur jalan relatif kurang memadai, sehingga dapat berpengaruh pada ketahanan perkerasan jalan dalam menahan beban lalu lintas. Secara teknik lapis perkerasan jalan sering tidak sesuai dengan umur rencana jalan selama masa pelayanan, sehingga menimbulkan kerusakan, seperti *bleeding*, alur,

retak, dan juga kerusakan jalan lainnya yang disebabkan adanya beberapa kendala dalam pemeliharaan jalan, sehingga diperlukan campuran perkerasan yang bersifat fleksibel dengan stabilitas dan durabilitas tinggi, tidak peka terhadap cuaca panas, tahan oksidasi, tahan terhadap rembesan air hujan, serta aman bagi lingkungan.

Ada beberapa cara untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan. Salah satu caranya adalah dengan meningkatkan kekakuan dan kekuatan pencampuran aspal dengan berbagai macam aditif. Aditif yang paling banyak digunakan adalah polimer. Modifikasi aspal oleh polimer menghasilkan material baru (*polymer - modified asphalt - PMA*) yang terkadang memiliki sifat mekanis yang sangat berbeda dari basis aspal aslinya (konvensional). Polimer yang telah digunakan untuk modifikasi aspal adalah *Styrene Butadiene-Styrene (SBS)*, *Styrene Butadiene Rubber (SBR)*, *elvaloy*, *rubber*, *ethylene vinyl acetate (EVA)*, *polyethylene*, dan lainnya (Lu, 1997; Yildirim, 2007). Modifikasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aspal campuran panas terhadap *rutting*, mengurangi kerusakan akibat kelelahan, meningkatkan daya rekat dan mengatasi masalah pengupasan pengikat dari agregat. Cara lain untuk meningkatkan kinerja campuran adalah dengan mengubah gradasi dan proporsi bahan ikat aspal. Namun, sebagai bahan termoplastik, aspal dibatasi pada kekakuan dan kekuatan yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan agregat dan juga mengoptimalkan struktur agregat dan proporsi volumetrik tidak dapat mengubah sifat material penyusunnya. Oleh karena itu, konsentrasi tegangan antara aspal dan agregat tidak bisa dihindari. Salah satu solusinya yaitu dengan melapisi agregat untuk membentuk lapisan perantara antara agregat dan bahan ikat aspal sehingga kinerja campuran aspal dapat meningkat secara signifikan.

Jenis beton aspal campuran panas banyak digunakan untuk jalan-jalan di Indonesia. Ada banyak jenis beton aspal campuran panas, salah satunya adalah *Stone Matrix Asphalt (SMA)*, yaitu campuran bergradasi senjang yang terdiri dari rangka (*skeleton*) agregat kasar yang dapat mencapai 70% dan mortar bahan pengikat aspal dengan proporsi tinggi. *SMA* mengandalkan kekuatan dari rangka (*skeleton*) agregat kasar, dan rongga di antaranya diisi dengan mastik dengan kadar aspal yang tinggi untuk memberikan durabilitas yang baik. Akibat kadar aspal yang

tinggi tersebut maka ada kecenderungan aspal akan mengalir (*draindown*) atau terpisah sebagian pada saat penyimpanan dan pengangkutan. Pada saat ini dikenal dua cara untuk mengurangi pengaliran aspal yaitu dengan bahan tambah yang menyerap sebagian aspal (*binder absorbers*). Bahan tambah ini di antaranya adalah selulosa, mineral fiber, *textile* dan plastik. Di antara bahan tambah tersebut yang paling umum digunakan adalah serat selulosa. Kemudian bahan tambah yang meningkatkan kekentalan aspal (*viscosity boosters*). Bahan tambah ini di antaranya adalah polimer (Suaryana, 2014). Secara fungsional campuran SMA memiliki beberapa keuntungan bagi pengguna jalan, yaitu umur pelayanan yang tinggi, mempunyai ketahanan gelincir (*skidresistant*), mengeliminasi kebisingan, dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap deformasi (*rutting*) sebagai akibat dari kandungan agregat kasar yang besar membentuk rangka agregat yang kuat dan rongga yang diisi *mastic* dengan kadar aspal tinggi. Tingginya kadar aspal ini juga meningkatkan fleksibilitas yang memberikan ketahanan terhadap retak lelah (*fatigue*). Kelemahan dari campuran ini yaitu biaya relatif lebih mahal dibanding campuran beraspal konvensional, sekitar 10% – 20% sebagai akibat dari penggunaan kadar aspal yang tinggi dan penambahan bahan penstabil, dan resiko munculnya titik-titik aspal pada permukaan sebagai akibat kesalahan variasi selama produksi atau kegagalan yang terjadi akibat sulitnya mencampur serat selulosa secara merata dalam campuran *Stone Matrix Asphalt* (Suaryana 2014).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mencari cara alternatif dalam meningkatkan kinerja campuran beraspal panas dengan mengubah metode pencampuran konvensional menjadi metode pencampuran dua tahap dan membandingkan hasil karakteristik kedua metode pencampuran tersebut. Pada metode pencampuran dua tahap ini, tahapan pertama didasarkan pada pelapisan awal agregat kasar dengan aspal sesuai kadar aspal optimum untuk lapisan antara agregat kasar dan aspal, tahapan kedua mencampurkan agregat halus dan *filler* pada campuran tersebut dengan jenis campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian di atas, maka dibentuk rumusan masalah sebagai berikut ini.

1. Bagaimana pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap karakteristik *Marshall test* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*?
2. Bagaimana pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Index of Retained Strength (IRS)* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*?
3. Bagaimana pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai kuat Tarik langsung (*Indirect Tensile Strength*) pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*?
4. Bagaimana pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Tensile Strength Ratio (TSR)* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*?
5. Bagaimana pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Cantabro Loss* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut ini.

1. Mengetahui pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap karakteristik *Marshall test* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.
2. Mengetahui pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Index of Retained Strength (IRS)* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.
3. Mengetahui pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai kuat Tarik langsung (*Indirect Tensile Strength*) pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

4. Mengetahui pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Tensile Strength Ratio (TSR)* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.
5. Mengetahui pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Cantabro Loss* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut ini.

1. Mengetahui perbandingan kualitas campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm antara menggunakan metode pencampuran secara konvensional dan menggunakan metode pencampuran dua tahap.
2. Mengetahui perbandingan kualitas antara aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm.
3. Menjadi referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya yang akan membahas metode pencampuran dua tahap pada jenis beton aspal campuran panas lainnya.

#### **1.5 Batasan Penelitian**

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut ini.

1. Jenis campuran yang diteliti adalah *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm sesuai spesifikasi SNI 8129:2015.
2. Agregat yang digunakan adalah agregat kasar, agregat halus, dan *filler* dari batu pecah (*Stone Crusher*), yang semua berasal dari sungai Clereng, Kabupaten Kulon Progo, DIY.
3. Aspal yang digunakan adalah aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*. Sifat-sifat kimia yang terdapat di dalam aspal penetrasi tidak dibahas secara mendalam pada pembahasan.
4. Serat selulosa yang digunakan adalah dedak padi sebanyak 0,3% dari berat total campuran sesuai spesifikasi SNI 8129:2015.

5. *Design Mix Formula* mengacu pada SNI 8129:2015 tentang Spesifikasi *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm.
6. Pada pengujian untuk mencari kadar aspal optimum (KAO), kadar aspal yang digunakan adalah 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% terhadap berat total campuran.
7. Pengujian karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm terdiri dari *Marshall Test*, *Index of Retained Strength (IRS)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)*, *Tensile Strength Ratio (TSR)*, dan *Cantabro* dengan menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.
8. Untuk membandingkan spesimen yang disiapkan, pengujian ini menggunakan dua metode pencampuran. Campuran pertama dibuat dengan metode pencampuran konvensional dan campuran kedua dibuat dengan metode pencampuran dua tahap yang di dasarkan pada pelapisan awal agregat kasar dengan jumlah bahan ikat aspal sesuai kadar aspal optimum.
9. Analisis karakteristik campuran pada penelitian ini adalah hasil dari pengujian laboratorium dan dibahas sesuai teori serta dibandingkan dengan spesifikasi yang digunakan.
10. Pengujian dan penelitian dilakukan di Laboratorium Perkerasan Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

## **BAB II**

### **STUDI PUSTAKA**

#### **2.1 Kinerja Perkerasan Jalan dengan Metode Pencampuran Dua Tahap**

Huang dkk (2005) melakukan studi dengan melapisi agregat kasar menggunakan aspal alam sebelum dicampur dengan agregat halus dan semen aspal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat campuran menjadi lebih homogen. Hasil dari metode ini didefinisikan sebagai sistem tiga lapis yang menunjukkan bahwa metode ini dapat meningkatkan kinerja campuran aspal. Pelapisan agregat dengan film tipis pengikat *bitumen* biasanya memecahkan masalah debu dan memberikan daya rekat yang baik. Pelapisan awal agregat digunakan untuk memberikan bantuan dalam mencapai ikatan awal antara partikel agregat dan pengikat.

Kok dan Kologlu (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh metode pencampuran dua fase terhadap sifat mekanik campuran aspal panas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan kinerja dari penggunaan metode pencampuran dua fase dan metode pencampuran konvensional. Hasil dari metode pencampuran ini adalah metode pencampuran dua fase dapat meningkatkan *Marshall Quotient*, *stiffness*, kekakuan, umur kelelahan dan penurunan kerusakan aspal campuran panas yang disebabkan kelembaban. Metode pencampuran dua fase pada campuran aspal modifikasi memiliki pengaruh yang lebih besar daripada campuran dengan aspal yang tidak dimodifikasi.

Hasemi dkk (2015) melakukan analisis pengaruh urutan pencampuran terhadap kinerja campuran aspal. Tujuan dari penelitian ini difokuskan untuk menghubungkan efek urutan pencampuran pada kemampuan kerja dan kinerja mekanik campuran aspal. Hasil dari penelitian ini efek dari perubahan urutan pencampuran aspal menghasilkan perilaku campuran yang lebih kaku. Nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi. Modulus pada metode pencampuran ini lebih tinggi 14% daripada metode konvensional. Kekuatan tarik campuran ini secara signifikan lebih tinggi 45% dari campuran konvensional.

## 2.2 Kinerja Perkerasan Jalan dengan Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Suryana (2016) melakukan kajian tentang pengembangan model deformasi permanen untuk campuran *Stone Matrix Asphalt*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan model deformasi permanen sehingga dapat diketahui variabel-variabel yang mempengaruhi ketahanan campuran terhadap deformasi permanen. Model yang dikembangkan dibatasi untuk *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yang dipercaya merupakan campuran beraspal yang lebih tahan terhadap alur. Hasil dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai *flow number* (ketahanan terhadap alur) campuran *Stone Matrix Asphalt* akan menurun jika temperatur dan *void* dalam campuran meningkat, dan *flow number* akan meningkat jika *filler* bertambah dalam rentang tertentu. *Flow number* juga akan meningkat dengan meningkatnya viskositas aspal.

Hidayat, R (2019) melakukan penelitian tentang analisis campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan *filler* pengganti abu ampas tebu. Pada penelitian ini memanfaatkan limbah abu ampas tebu sebagai bahan *filler* pengganti campuran SMA. Hasil penelitian ini disimpulkan bahwa seiring bertambahnya kadar *filler* pengganti abu ampas tebu hingga kadar 25% dapat meningkatkan nilai stabilitas sebesar 39.73%. Peningkatan nilai *flow* terjadi pada kadar abu ampas tebu 50% dan 75%. Nilai *MQ* cenderung sama seperti stabilitas. Nilai *IRS* pada kadar *filler* pengganti 0%, 25%, dan 50% telah memenuhi spesifikasi Bina Marga (2010), sedangkan pada kadar abu ampas tebu 75% belum memenuhi standar Bina Marga (2010). Nilai *ITS* mengalami kenaikan sampai kadar *filler* 50%. Dan nilai *Cantabro Loss* pada kadar *filler* pengganti abu ampas tebu mengalami kenaikan seiring penambahan kadar *filler* dengan nilai paling besar pada kadar abu ampas tebu 75% sebesar 14,280%, namun tetap memenuhi standar persyaratan Bina Marga yaitu < 20%.

## 2.3 Kinerja Perkerasan Jalan dengan Bahan Ikat Aspal *Crumb Rubber*

Ritonga dan Winsyahputra (2013) melakukan penelitian tentang modifikasi aspal dengan menggunakan karet alam siklit (*Cyclic Natural Rubber*). Penelitian ini memanfaatkan karet alam siklit untuk membuat aspal modifikasi dengan tujuan

meningkatkan kinerja aspal. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa komposisi optimum terjadi pada penambahan *CNR* maksimal 6 phr memenuhi standar persyaratan fisik aspal. Penambahan *CNR*-asam akrilat dan BPO maksimal *CNR* 6 phr, 0,5 phr asam akrilat dan 0,05 mr BPO juga memenuhi standar persyaratan fisik aspal. Dari pengujian *Marshall* menunjukkan bahwa penambahan *CNR* mengakibatkan penurunan nilai densitas (kepadatan/berat isi) dan rongga yang terisi aspal (*VFA*), serta meningkatkan nilai stabilitas, *flow*, dan rongga dalam campuran (*VIM*) jika dibandingkan dengan aspal murni. Dari pembahasan karakteristik fisik aspal, penambahan *CNR* berakibat semakin baiknya nilai stabilitas, kelenturan, kekesatan atau ketahanan geser, dan mudah untuk dilaksanakan serta semakin meningkatkan keawetan, ketahan terhadap kelelahan, dan kedap air jika dibandingkan dengan aspal murni. Hasil pengujian *Marshall* juga menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal-*CNR* 6 % efektif dalam meningkatkan karakteristik fisik aspal dimana dihasilkan nilai stabilitas maksimum sebesar 1481 kg dan nilai *flow* maksimum sebesar 5,05 mm. Keadaan itu menyebabkan aspal menjadi tahan terhadap beban lebih berat, bersifat kaku dan tidak mudah mengalami deformasi plastis sehingga baik digunakan untuk jalan raya.

Purnomo dkk (2014) melakukan penelitian mengenai pemanfaatan *Crumb Rubber (Tyre Rubber)* sebagai aditif pada aspal modifikasi polimer. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil pengujian sifat aspal dan peningkatan nilai penetrasi, titik lembek, dan viskositas yang merupakan interpretasi kemampuan dalam menahan beban, suhu tinggi, dan suhu rendah. Hasil pengujian *Marshall* menunjukkan bahwa campuran dengan aspal modifikasi polimer *crumb rubber* memiliki nilai stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas yang berada di atas campuran konvensional. Berdasarkan hal tersebut diambil kesimpulan bahwa *crumb rubber* dapat digunakan sebagai aditif. Aspal modifikasi polimer memiliki sifat aspal dan campuran perkerasan yang lebih baik dari aspal dan campuran konvensional. Nilai optimum yang dapat digunakan dalam aspal modifikasi polimer adalah antara 5 % dan 10 %.

Wiranata, A (2018) melakukan kajian tentang pengaruh mistikasi karet terhadap karakteristik campuran aspal karet. Tujuan dilakukan penelitian ini adalah menganalisis spesifikasi teknis aspal karet terhadap campuran aspal panas. Hasil dari penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan *crumb rubber* ke dalam aspal murni pen 60/70 mengakibatkan meningkatnya titik lembek, stabilitas aspal, dan menurunnya kehilangan berat aspal. Penambahan *crumb rubber* yang lebih baik adalah 10% karena dapat meningkatkan kehilangan berat, penetrasi, titik lembek, dan stabilitas yang memenuhi standar. Temperatur pencampuran terbaik adalah suhu 150°C karna menghasilkan penetrasi titik lembek tinggi.



## 2.4 Penelitian Terdahulu

Perbedaan penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

**Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Penulis dengan Penelitian Terdahulu**

No	Aspek	Huang dkk (2005)	Kok dan Kuloglu (2011)	Hasemi dkk (2015)	Suryana (2016)	Hidayat, R (2019)	Ritonga dan Winsyahputra (2013)	Purnomo dkk. (2014)	Wiranata, A (2018)	Peneliti (2020)
1.	Judul	Investigasi Terhadap Campuran <i>HMA</i> Tiga Lapis	Pengaruh Pencampuran Dua Fase pada Sifat Mekanik Aspal Campuran Panas	Pengaruh Urutan Pencampuran Terhadap Kemampuan Kerja dan Kinerja Campuran Aspal	Pengembangan Model Korelasi antara Modulus Resilen dengan Modulus Dinamis untuk Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	Analisis Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> Dengan Abu Ampas Tebu Sebagai <i>Filler</i> Pengganti	Modifikasi Aspal dengan Menggunakan Karet Alam Siklit ( <i>Cyclic Natural Rubber</i> )	Pemanfaatan <i>Crumb Rubber (Tyre Rubber)</i> Sebagai Aditif pada Aspal Modifikasi Polimer	Pengaruh Mistikasi Karet Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Karet Spesifikasi Teknis ( <i>Crumb Rubber</i> )	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> Dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>
2.	Jenis Campuran	<i>Hot Mix Agregat (HMA)</i>	<i>Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)</i>	<i>Split Mastic Asphalt</i>	<i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	<i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	<i>Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)</i>	Laston ( <i>AC</i> )	<i>Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)</i>	<i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>
3.	Jenis Aspal	<i>AC - 20</i>	<i>AC-5, AC-10, dan AC-20</i>	<i>AC-10</i>	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70	Aspal Modifikasi <i>Crumb Rubber</i>	Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>	Aspal Pen 60/70 dan Aspal <i>Crumb Rubber</i>
4.	Pengujian	<i>Marshall Test</i>	<i>Marshall Quotient, IRS, dan ITS</i>	<i>X – ray computed, workability, viskositas campuran</i>	Pengujian pengaliran aspal ( <i>draindown</i> )	<i>Marshall Test, IRS, ITS, Cantabro, dan Poisson Ratio</i>	<i>Marshall Test</i>	<i>Marshall Test</i>	<i>Penetration dan Marshall Test</i>	<i>Marshall Test, IRS, ITS, TSR, dan Contabro</i>

Sumber : Huang (2005), Kok dan Kuloglu (2011), Hasemi dkk (2015), Hidayat, R (2019), Ritonga dan Winsyahputra (2013), Purnomo dkk (2012), Wiranata (2018)

**Tabel 2.1 Lanjutan Perbandingan Penelitian Penulis dengan Penelitian Terdahulu**

No	Aspek	Huang dkk (2005)	Kok dan Kuloglu (2011)	Hasemi dkk (2015)	Suryana (2016)	Hidayat, R (2019)	Ritonga dan Winsyahputra (2013)	Purnomo dkk. (2014)	Wiranata, A (2018)	Peneliti (2020)
5.	Hasil	<p>Metode ini meningkatkan kinerja campuran aspal. Pelapisan agregat dengan film tipis pengikat <i>bitumen</i> biasanya memecahkan masalah debu dan memberikan daya rekat yang baik. Pelapisan awal agregat digunakan untuk memberikan bantuan dalam mencapai ikatan awal antara partikel agregat dan pengikat.</p>	<p>Metode pencampuran dua fase meningkatkan <i>Marshall Quotient</i>, <i>stiffness</i>, kekakuan, umur kelelahan dan penurunan kerusakan aspal campuran panas yang disebabkan kelembaban. Sistem pencampuran dua fase pada campuran yang dimodifikasi memiliki pengaruh yang lebih besar daripada campuran yang tidak dimodifikasi.</p>	<p>Hasil dari penelitian ini efek dari perubahan urutan pencampuran aspal menghasilkan perilaku campuran yang lebih kaku. Nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi. Modulus pada metode pencampuran ini lebih tinggi 14% daripada metode konvensional. Kekuatan Tarik campuran ini secara signifikan lebih tinggi 45% dari campuran konvensional.</p>	<p>Hasil dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai <i>flow number</i> (ketahanan terhadap alur) campuran <i>Stone Matrix Asphalt</i> akan menurun jika temperatur dan <i>void</i> dalam campuran meningkat, dan <i>flow number</i> akan meningkat jika <i>filler</i> bertambah dalam rentang tertentu. <i>Flow number</i> juga akan meningkat dengan meningkatnya viskositas aspal.</p>	<p>Seiring bertambahnya kadar <i>filler</i> pengganti abu ampas tebu hingga kadar 25% dapat meningkatkan nilai stabilitas. Peningkatan nilai <i>flow</i> terjadi pada kadar abu ampas tebu 50% dan 75%. Nilai <i>MQ</i> cenderung sama seperti stabilitas. Nilai <i>IRS</i> pada kadar <i>filler</i> pengganti 0%, 25%, dan 50% telah memenuhi spesifikasi Bina Marga (2010). Nilai <i>ITS</i> mengalami kenaikan sampai kadar <i>filler</i> 50%. Nilai <i>Cantabro</i> mengalami kenaikan seiring penambahan kadar <i>filler</i></p>	<p>penambahan <i>CNR</i> mengakibatkan penurunan nilai densitas (kepadatan/berat isi) dan rongga yang terisi aspal (<i>VFA</i>), serta meningkatkan nilai stabilitas, <i>flow</i>, dan rongga dalam campuran (<i>VIM</i>) jika dibandingkan dengan aspal murni. Dari pembahasan karakteristik fisik aspal, penambahan <i>CSR</i> berakibat semakin baiknya nilai stabilitas, kelenturan, kekesatan atau ketahanan geser, dan mudah untuk dilaksanakan</p>	<p>Meningkatnya nilai penetrasi, titik lembek, dan viskositas. Kemampuan dalam menahan beban, suhu tinggi, dan suhu rendah. Hasil pengujian <i>Marshall</i> menunjukkan bahwa campuran dengan aspal modifikasi polimer <i>crumb rubber</i> memiliki nilai stabilitas, fleksibilitas dan durabilitas yang berada di atas campuran konvensional. Berdasarkan hal tersebut diambil kesimpulan bahwa <i>crumb rubber</i> dapat digunakan sebagai aditif..</p>	<p>Meningkatnya titik lembek, stabilitas aspal, dan menurunnya kehilangan berat aspal. Penambahan <i>crumb rubber</i> yang lebih baik adalah 10% memiliki kehilangan berat, penetrasi, titik lembek, dan stabilitas memenuhi standar. Temperatur pencampuran terbaik adalah suhu 150°C karna menghasilkan penetrasi titik lembek tinggi</p>	<p>Dalam pengujian karakteristik <i>Marshall</i>, <i>IRS</i>, <i>ITS</i>, dan <i>TSR</i> dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai yang lebih tinggi dari penggunaan metode pencampuran konvensional, dan pada pengujian karakteristik <i>cantabro</i> penggunaan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai yang lebih rendah dari metode pencampuran konvensional. Penelitian ini dapat disimpulkan bahwa metode pencampuran dua tahap dapat digunakan sebagai metode alternative untuk meningkatkan mutu dan kinerja campuran <i>SMA</i> 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i>.</p>

Sumber : Huang (2005), Kok dan Kuloglu (2011), Hasemi dkk (2015), Hidayat, R (2019), Ritonga dan Winsyahputra (2013), Purnomo dkk (2014), Wiranata (2018)

## 2.5 Perbedaan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Berikut beberapa perbedaan penelitian yang dilakukan dengan penelitian terdahulu.

1. Penelitian ini menggunakan jenis campuran yaitu *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm sedangkan penelitian terdahulu menggunakan campuran *HMA*, *AC-BC*, *Split Mastic Asphalt*, dan Laston.
2. Penelitian ini menggunakan dua metode pencampuran pada saat proses pencampuran agregat dengan aspal sedangkan penelitian terdahulu menggunakan satu metode pencampuran. Kedua metode tersebut antara lain:
  - a) Metode pencampuran konvensional dengan proses pembuatan sampel campuran secara konvensional sesuai standar SNI, BinaMarga, dan *AASTHO*.
  - b) Metode pencampuran Dua Tahap. Metode baru ini didasarkan pada pelapisan agregat kasar oleh aspal sesuai kadar aspal optimum. Kemudian dicampur dengan agregat halus + *filler*.
3. Penelitian ini mengacu kepada spesifikasi SNI 8129:2015 tentang Spesifikasi Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm. Sedangkan penelitian terdahulu menggunakan spesifikasi Bina Marga tahun 2010 dan *AASTHO*.
4. Penelitian ini menggunakan aspal penetrasi 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dengan dua jenis bahan ikat sedangkan penelitian terdahulu hanya menggunakan satu jenis bahan ikat.
5. Penelitian ini menggunakan parameter yang diuji berupa *Marshall Test*, *Index of Retained Strength (IRS)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)*, *Contabro*, dan *Tensile Strength Ratio (TSR)*. Sedangkan penelitian terdahulu tidak menggunakan pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)*.

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Struktur Perkerasan Jalan**

Struktur perkerasan jalan merupakan lapisan perkerasan yang terletak di antara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan yang berfungsi memberikan pelayanan kepada sarana transportasi. Perkerasan jalan terdiri dari berbagai lapis material yang diletakkan di atas tanah dasar. Komponen lapisan material terdiri dari beberapa macam bahan granular yang dapat memberikan sokongan penting dari kapasitas struktural sistem perkerasan.

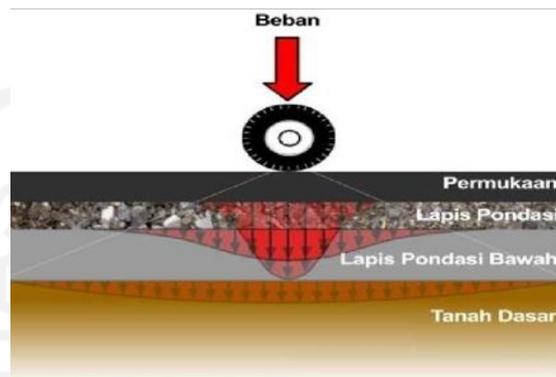
Material utama pembentuk lapisan perkerasan jalan adalah agregat, yaitu 90% - 95% dari berat campuran perkerasan. Daya dukung lapisan perkerasan ditentukan dari sifat butiran agregat dan gradasi agregatnya. Bahan pengikat seperti aspal dan semen digunakan sebagai pengikat agregat agar terbentuk lapisan kedap air.

Perlunya struktur perkerasan jalan dirancang dengan mempertimbangkan banyak faktor agar lapis permukaan dapat kuat menopang beban lalu lintas yang berulang. Kondisi tanah asli di alam jarang sekali dalam kondisi yang mampu menahan beban kendaraan tanpa mengalami deformasi yang besar. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu struktur yang dapat melindungi tanah dasar dari beban roda kendaraan yaitu struktur perkerasan (*pavement*). Menurut Sukirman (1999) jenis konstruksi perkerasan dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (*composite pavement*).

#### **3.2 Perkerasan Lentur (*Flexible Pavment*)**

Konstruksi perkerasan lentur merupakan campuran agregat kasar, agregat halus, material pengisi (*filler*) dan aspal yang kemudian dihamparkan di lapangan kemudian dipadatkan dengan alat berat. Pada umumnya perkerasan lentur baik digunakan untuk jalan yang melayani beban lalu lintas ringan sampai sedang, seperti jalan perkotaan, jalan dengan sistem utilitas terletak di bawah perkerasan

jalan, perkerasan bahu jalan, atau perkerasan dengan konstruksi bertahap. Perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas (Sukirman, 1999). Mekanisme pembebanan untuk konstruksi perkerasan lentur dapat dilihat pada Gambar 3.1



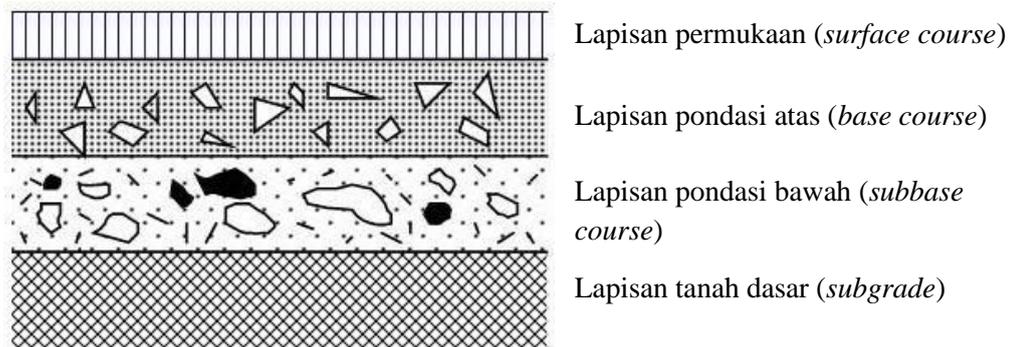
**Gambar 3.1 Distribusi Beban Roda Perkerasan Lentur**

(Sumber: Sukirman, 1999)

Berdasarkan Gambar 3.1 lapis permukaan (*surface course*) berhubungan langsung dengan beban roda yang mendistribusikan beban terpusat, sehingga tekanan yang terjadi pada lapis tanah dasar menjadi lebih kecil. Lapis struktur perkerasan harus dibuat dengan sifat modulus kekakuan (modulus elastisitas) lapis di atas lebih besar dari pada lapis di bawahnya. Lapis permukaan bersifat kasar dengan tujuan mempunyai kekesatan agar aman sehingga mempunyai koefisien gesek yang besar antara roda dan permukaan perkerasan.

### 3.2.1 Macam-macam Lapisan Perkerasan Lentur

Struktur perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapis apabila semakin ke bawah, maka tiap lapisan memiliki daya dukung tanah yang tidak stabil. Komponen material lapisan tersebut akan memberikan dukungan penting dari kapasitas struktur perkerasan. Untuk mendapatkan struktur perkerasan yang baik maka dibuat berlapis-lapis berdasarkan kebutuhan dari tiap lapisan. Setiap lapis pada perkerasan lentur mempunyai fungsi yang berbeda-beda dengan tujuan mendistribusikan beban sampai ke bawah. Gambar 3.2 di bawah ini adalah komponen lapisan pada perkerasan lentur.



**Gambar 3.2 Lapisan Perkerasan Lentur**

(Sumber: Romadhona, 2014)

1. Menurut Sukirman (1999), lapis permukaan adalah bagian lapis perkerasan yang terletak di paling atas dari struktur perkerasan jalan, lapis permukaan dapat dibedakan menjadi 2 bagian yaitu:
  - a. Lapis Aus (*Wearing Course*)  
Merupakan bagian dari lapis permukaan yang terletak di atas lapis permukaan antara (*binder course*). Tebal minimum lapis perkerasan *wearing course* 4 cm
  - b. Lapis Permukaan Antara (*Binder Course*)  
Merupakan bagian dari lapis permukaan yang terletak diantara lapis aus (*wearing course*) dengan lapis pondasi atas (*base course*). Tebal minimum lapis perkerasan *binder course* 6 cm.

Bahan untuk lapis permukaan (*surface course*) umumnya adalah sama dengan bahan untuk lapis pondasi, dengan persyaratan yang lebih tinggi. Penggunaan bahan aspal diperlukan agar lapis dapat bersifat kedap air, disamping itu bahan aspal sendiri memberikan bantuan tegangan tarik, yang berarti mempertinggi daya dukung lapis terhadap beban roda lalu lintas.
2. Lapisan pondasi atas (*base course*) merupakan bagian perkerasan yang terletak antara lapis permukaan dengan lapis pondasi bawah (atau dengan tanah dasar bila tidak menggunakan lapis pondasi bawah). Bahan-bahan untuk lapis pondasi umumnya harus cukup kuat dan awet sehingga dapat menahan beban-beban roda. Lapisan pondasi atas (*base course*) terletak diantara lapis permukaan antara dan lapis pondasi bawah. Tebal minimum lapis perkerasan *base course* 7,5 cm. Fungsi lapis pondasi antara lain sebagai berikut.

- a. Sebagai bagian perkerasan yang menahan beban roda,
  - b. Sebagai perletakan terhadap lapis permukaan.
3. Lapis pondasi bawah (*subbase course*) merupakan lapis perkerasan yang terletak diantara lapis pondasi dan tanah dasar.
- Fungsi lapis pondasi bawah antara lain sebagai berikut.
- a. Sebagai bagian dari konstruksi perkerasan untuk mendukung dan menyebarkan beban roda.
  - b. Mencapai efisiensi penggunaan material yang relatif murah agar lapisan-lapisan selebihnya dapat dikurangi tebalnya (penghematan biaya konstruksi).
  - c. Untuk mencegah tanah dasar masuk ke dalam lapis pondasi.
  - d. Sebagai lapis pertama agar pelaksanaan dapat berjalan lancar.
4. Tanah dasar (*subgrade*) merupakan permukaan tanah awal atau tanah asli. Beban kendaraan yang dilimpahkan ke lapisan perkerasan melalui roda-roda kendaraan selanjutnya disebarkan ke lapisan-lapisan di bawahnya dan terakhir oleh tanah dasar.

### 3.3 Material Penyusun Perkerasan Lentur Jalan

Pada perkerasan lentur terdapat beberapa bahan penyusun di dalamnya. Bahan penyusun tersebut terdiri dari 2 jenis, yaitu bahan pokok yang bisa berupa pasir, kerikil, batu pecah dan lain- lain serta bahan ikat yang bisa berupa tanah liat, aspal, semen *portland*, dan kapur. Khusus untuk bahan ikat dapat disesuaikan tergantung dari jenis perkerasan jalan yang akan dipakai nantinya.

#### 3.3.1 Aspal

Aspal merupakan bahan pengikat agregat berwarna hitam atau coklat tua pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat. Aspal mempunyai sifat *thermoplastic* apabila aspal dipanaskan sampai temperatur tertentu, aspal dapat berubah menjadi lunak hingga cair sehingga dapat membungkus partikel agregat pada waktu pembuatan beton aspal atau dapat masuk kedalam pori-pori yang ada dalam proses penyemprotan atau penyiraman. Banyaknya aspal dalam campuran perkerasan berkisar antara 4% - 10% berdasarkan berat campuran, atau 10% - 15% berdasarkan volume campuran (Sukirman, 2007).

Berdasarkan proses pembuatannya jenis aspal sendiri bermacam-macam. Berikut ini adalah penjabaran dari masing-masing jenis aspal tersebut.

1. Aspal alam

Aspal alam yang diperoleh di gunung-gunung seperti aspal di Pulau Buton, dan ada yang diperoleh di danau seperti Trinidad. Aspal alam terbesar di dunia terdapat di Trinidad, berupa aspal danau (*Trinidad Lake Asphalt*). Indonesia memiliki aspal alam yaitu di Pulau Buton, yang berupa aspal gunung, terkenal dengan nama Asbuton (Aspal Batu Buton). Asbuton merupakan campuran antara *bitumen* dengan bahan mineral lainnya dalam bentuk batuan.

2. Aspal buatan/minyak

Merupakan aspal yang didapat dari residu destilasi minyak bumi. Setiap minyak bumi dapat menghasilkan residu jenis *asphaltic base crude oil* yang banyak mengandung aspal, atau *mixed base crude oil* yang mengandung campuran antara parafin dan aspal. Di Indonesia, aspal pen 60/70 adalah yang umum digunakan sebagai bahan ikat perkerasan lentur jalan.

3. Aspal modifikasi

Jenis aspal ini merupakan aspal yang terbentuk dari campuran aspal buatan khususnya aspal keras dengan bahan tambahan tertentu. Biasanya bahan yang digunakan sebagai campuran adalah jenis bahan *polymer*, antara lain *polymer elastomer* dan *polymer plastomer*. Salah satu jenis aspal modifikasi yaitu aspal *Crumb Rubber* atau aspal karet. Aspal *Crumb Rubber* adalah hasil pencampuran aspal minyak dan serpihan karet dengan perbandingan tertentu yang dicampur secara panas. Karet panas yang dicampurkan ke dalam aspal akan terdispersi, reaksi kimia terbentuk dengan bagian cair *bitumen* yang menyebabkan kadar *ashpaltene* naik sehingga aspal menjadi lebih kental dan keras akan tetapi tetap masih elastis. Modifikasi aspal karet atau aspal *Crumb Rubber* berfungsi meningkatkan ketahanan aspal terhadap temperatur, meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi, meningkatkan ketahanan lelah terhadap campuran beraspal, dan mengurangi terjadinya pelepasan butiran.

Dalam penelitian ini aspal yang digunakan sebagai bahan ikat adalah aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*. Ketentuan aspal tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

**Tabel 3.1 Persyaratan Aspal Padat**

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Aspal Penetrasi 60/70	Aspal yang Dimodifikasi Elastomer Sintetis
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70	Min. 40
Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48	≥ 55
Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100	≥ 100
Titik nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232	≥ 232
Kelarutan dalam <i>Trichoroethylene</i> (%)	ASTM D2042	≥ 99	≥ 99
Berat jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0	≥ 1,0

(Sumber : SNI 8129:2015)

### 3.3.2 Agregat

Agregat adalah komponen bahan yang terdiri dari material yang padat yang digunakan sebagai bahan untuk campuran aspal. Di dalamnya terdiri dari pasir, krikil, batu pecah dan agregat halus. Sifat agregat merupakan salah satu faktor penentu kemampuan perkerasan jalan memikul beban lalu lintas dan daya tahan terhadap cuaca. Bagian terbesar dari campuran aspal adalah agregat, menempati kira-kira 75 – 80 % dari volume campuran dan atau 90 – 95% dari persentase berat campuran, sehingga pengaruhnya terhadap sifat serta kinerja (*performance*) dari campuran sangat besar. Agregat yang ideal untuk campuran berbitumen harus mempunyai ukuran partikel serta gradasi yang baik, kuat, teguh, serta mempunyai bentuk partikel yang bersudut. Selain itu, juga dibutuhkan porositas yang rendah, permukaan yang bersih, dan tekstur permukaan yang kasar (*Totomihardjo, 1998*). Agregat dikelompokkan menjadi 3 jenis sesuai dengan persyaratannya, yaitu sebagai berikut ini.

### 1. Agregat Kasar

Agregat kasar untuk rancangan campuran *Stone Matrix Asphalt* adalah yang tertahan saringan No.4 (4,76 mm) dan haruslah bersih, keras awet dan bebas dari lempung atau bahan yang tidak dikehendaki lainnya dan memenuhi syarat yang diberikan pada Tabel 3.2 berikut ini.

**Tabel 3.2 Persyaratan Agregat Kasar**

Pengujian	Standar	Nilai
Berat jenis agregat	SNI 03-1969-1990	Min. 2,5 %
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium atau magnesium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12%
Penyerapan	SNI 03-1969-1990	Maks. 3%
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i>	SNI 2417:2008	Maks. 30%
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439:2011	Min. 95%
Angualitas	ASTM D 5821-01	100/90
Partikel pipih dan lonjong	RSNI T-01-2005	Maks. 5%

(Sumber : SNI 8129:2015)

### 2. Agregat Halus

Agregat halus merupakan agregat dengan ukuran butiran yang lolos saringan No.4 (4,76 mm) sesuai SNI 03-6819-2002. Agregat halus harus memenuhi persyaratan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.3 berikut ini.

**Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Halus**

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 60%
Material lolos ayakan No.200	SNI 03-4142-1996	Maks. 1%
Angualitas	SNI 03-6877-2002	Min. 45%
Batas cair ( <i>Liquid Limit, LL</i> )	SNI 1967:2008	Maks 25
Indeks plastis ( <i>Plastic Index, PI</i> )	SNI 1966:2008	NP

(Sumber : SNI 8129:2015)

### 3. Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi (*filler*) merupakan agregat lolos saringan No.200 (0,075 mm) yang terdiri dari abu batu, abu batu kapur, semen (*portland cement*) atau bahan non plastis lainnya. *Filler* berfungsi sebagai pengisi rongga di antara butiran

agregat kasar dengan tujuan mengurangi rongga, meningkatkan stabilitas dan meningkatkan kerapatan.

### 3.3.3 Gradasi Agregat

Gradasi agregat adalah susunan butir agregat yang sesuai dengan ukurannya. Ukuran butir agregat dapat diperoleh melalui pemeriksaan analisis saringan. Satu set saringan umumnya terdiri dari saringan berukuran 4 inci, 3½ inci, 3 inci, 2½ inci, 2 inci, 1½ inci, 1 inci, ¾ inci, ½ inci, 3/8 inci, No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, dan No. 200. Ukuran saringan dalam ukuran panjang menunjukkan ukuran bukaan, sedangkan nomor saringan menunjukkan banyaknya bukaan dalam 1 inci panjang (Sukirman, 2003).

### 3.3.4 Bahan Aditif

Salah satu alternatif bahan aditif yang dapat digunakan sebagai bahan tambah untuk campuran beton aspal yaitu serat selulosa. Serat selulosa merupakan suatu bahan stabilisasi aspal yang berguna menaikkan titik lembek aspal, viskositas dan menurunkan penetrasinya. Serat selulosa berfungsi untuk mencegah deformasi dan retak permukaan jalan pada suhu tinggi. Bahan ini mencegah penguraian pada pencampuran, pengangkutan, penghamparan, dan pemadatan. Di Indonesia banyak campuran *Stone Matrix Asphalt* biasanya menggunakan bahan tambah berupa serat selulosa (Mashuri dkk, 2011).

Dedak padi merupakan salah satu alternatif sebagai serat selulosa dengan kandungan serat selulosa antara 8,54 % sampai 15,63%. Dedak padi adalah serat selulosa alami yang biasa dikenal dengan nama *cellulosa rice fiber*, yang saat ini hanya dimanfaatkan sebagai bahan baku industri pakan. Peningkatan kegunaan dedak padi membuat penelitian ini menggunakan dedak padi sebagai salah satu *fiber* alami yang mudah ditemukan serta ekonomis.

Menurut penelitian Tahir (2011), penggunaan selulosa dedak padi sebagai bahan tambah pada campuran *Split Mastik Asphalt (SMA)* umumnya memenuhi spesifikasi. Nilai durabilitas yang didapatkan untuk variasi kadar dedak padi 5% yaitu sebesar 94,88% lebih kecil dibanding tanpa tambahan dedak padi yaitu sebesar 95,17 %, kemudian penambahan kadar dedak padi sebesar 6%, 7% 8% dan

9% diperoleh nilai durabilitas yaitu sebesar 98,18%, 99,76%, 97,05%, dan 95,95% cenderung meningkat dibanding tanpa tambahan dedak padi. Hal ini mengindikasikan adanya ketahanan campuran terhadap pengaruh cuaca dan beban lalu lintas atau nilai keawetan yang cukup baik, sehingga penelitian ini menggunakan dedak padi sebagai serat selulosa.

### 3.4 Campuran *Stone Matrix Asphalt*

*Stone Matrix Asphalt* merupakan jenis campuran beraspal panas yang dapat digunakan sebagai lapis permukaan jalan. *Stone Matrix Asphalt (SMA)* tersusun atas *Split* (agregat kasar dengan kadar tinggi), *Matrix Asphalt* (campuran agregat halus, *filler* dan aspal dengan kadar relatif tinggi) ditambah dengan zat aditif untuk stabilisasi campuran.

Menurut *NCAT* (2009), campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* adalah beton aspal bergradasi senjang yang memiliki kandungan agregat kasar tinggi yaitu lebih dari 70% dan dapat membentuk rangka (*skeleton*) yang kuat. Campuran *SMA* memiliki ketahanan yang baik terhadap kerusakan alur (*rutting*) karena memiliki rangka agregat kasar yang kuat. Rongga antar partikel agregat diisi oleh mastik yang terdiri dari aspal, agregat halus dan *filler*. Kadar aspal yang tinggi, yang berkisar antara 6 - 7,5% dari total campuran, dapat meningkatkan durabilitas campurannya.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* memiliki kelebihan ketahanan yang tinggi terhadap deformasi sebagai akibat dari kandungan agregat kasar yang besar dan membentuk rangka agregat yang kuat. Sedangkan kekurangan *Stone Matrix Asphalt (SMA)* adalah biaya relatif lebih mahal akibat penggunaan kadar aspal yang tinggi dan penambahan bahan penstabil (Suaryana, 2012).

Spesifikasi gradasi campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* menurut SNI 8129:2015, ditunjukkan dalam persen terhadap berat agregat. Pemilihan tipe gradasi disesuaikan dengan tebal rancangan minimum serta harus memenuhi batas-batas yang ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut ini.

**Tabel 3.4 Gradasi Agregat Campuran *Stone Matrix Asphalt* 12,5 mm**

Ukuran Ayakan		% Berat yang lolos
<i>ASTM</i>	(mm)	Spesifikasi Gradasi Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>
1"	25	
¾"	19	100
½"	12,5	90 - 100
3/8"	9,5	50 - 80
No.4	4,75	20 - 35
No.8	2,36	16 - 24
No.200	0,075	8 - 11

(Sumber : SNI 8129:2015)

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* memenuhi batas-batas yang ditunjukkan pada Tabel 3.5 berikut ini.

**Tabel 3.5 Ketentuan Campuran *Stone Matrix Asphalt***

Sifat- sifat campuran		Persyaratan	
		<i>SMA</i>	<i>SMA Mod</i>
Kadar Aspal , %	Min.	6,0 – 7,0	
Jumlah tumbukan per bidang		75	
Rongga dalam campuran ( <i>VIM</i> ), %	Min.	4,0	
	Maks.	5,0	
Rongga dalam agregat ( <i>VMA</i> ), %	Min.	17	
Rasio <i>VCA / VCA</i>		< 1	
Draindown pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam)	Maks.	0,3	
Stabilitas <i>Marshall</i> , kg	Min.	600	750
	Min.	2	
Pelelehan, mm	Maks.	4,5	
	Min.	80	
<i>Tensile Strength Ratio (TSR)</i> , %	Min.	80	
Stabilitas dinamis, lintasan/mm	Min.	2500	3000

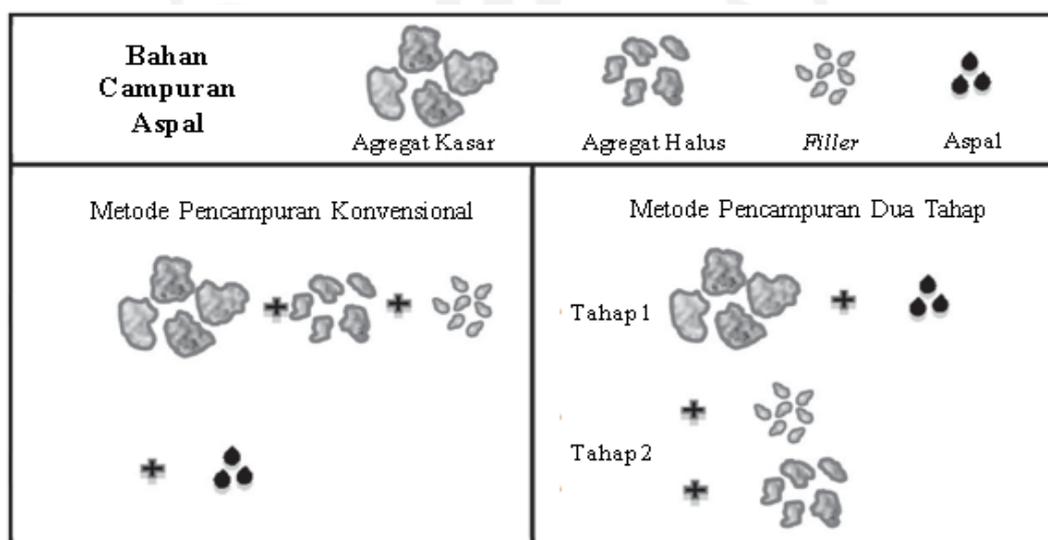
(Sumber : SNI 8129:2015)

### 3.5 Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode pencampuran dua tahap merupakan upaya untuk meningkatkan kinerja campuran beton aspal dengan mengubah tahapan pencampuran aspal dengan agregat. Metode baru ini didasarkan pada *pre-coating* agregat kasar dengan bahan ikat aspal sesuai kadar aspal optimum kemudian dicampur dengan agregat halus dan *filler* dengan tujuan memperkuat sifat adhesi aspal dengan agregat dan menurunkan kecenderungan pengelupasan agregat yang disebabkan oleh kelembaban dan dapat meminimalkan adanya debu atau kotoran yang dapat menurunkan kinerja campuran beraspal. (Kok dan Kuloglu, 2011).

Campuran aspal yang dihasilkan dengan metode pencampuran dua tahap menunjukkan distribusi rongga yang merata. Ini menandakan bahwa metode pencampuran dua tahap dapat lebih mudah dipadatkan. Campuran aspal yang dihasilkan dengan metode pencampuran dua tahap memiliki ketahanan yang lebih terhadap deformasi permanen dan memiliki kekuatan tarik tidak langsung yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional.

Ilustrasi proses metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini.



**Gambar 3.3 Ilustrasi Proses Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap**

(Sumber: Bjorn Birgisson dkk, 2015)

### 3.6 Karakteristik Lapis Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur adalah jenis perkerasan jalan yang terdiri dari campuran agregat dan aspal, dengan atau tanpa bahan tambahan. Suhu pencampuran ditentukan berdasarkan jenis aspal yang digunakan. Jika digunakan semen aspal, maka suhu pencampurannya antara 145°-155° C, sehingga disebut beton aspal campuran panas. Tujuan karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh lapis perkerasan lentur adalah stabilitas (*stability*), keawetan (*durabilitas*), kelenturan (*flexibility*), ketahanan leleh (*fatigue resistance*), ketahanan geser (*skid resistance*), kedap air, dan kemudahan dalam pelaksanaan (*workability*) (Sukirman, 2003). Karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh lapis perkerasan lentur adalah sebagai berikut.

#### 3.6.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur dan *bleeding*. Kebutuhan akan stabilitas sebanding dengan fungsi jalan, dan beban lalu lintas yang akan dilayani. Jalan yang melayani volume lalu lintas tinggi dan dominan terdiri dari kendaraan berat, membutuhkan perkerasan jalan dengan stabilitas tinggi. Kriteria desain *Marshall* untuk stabilitas minimum yang memenuhi spesifikasi SMA dan mengacu pada SNI 8129:2015 adalah minimal 600 kg. Akan tetapi kestabilan yang tinggi menyebabkan lapisan perkerasan menjadi kaku dan cepat mengalami retak. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai stabilitas beton aspal diantaranya sebagai berikut.

1. Gesekan internal yang dapat berasal dari kekasaran permukaan dari butir-butir agregat, luas bidang kontak antar butir atau bentuk butir, gradasi agregat, kepadatan campuran, dan tebal film aspal. Stabilitas terbentuk dari kondisi gesekan internal yang terjadi diantara butir-butir agregat, saling mengunci dan mengisinya butir-butir agregat, dan masing-masing butir saling terikat akibat gesekan antar butir dan adanya aspal. Kepadatan campuran menentukan pula tekanan kontak, dan nilai stabilitas campuran. Pemilihan agregat bergradasi baik atau rapat akan memperkecil rongga antara agregat, sehingga aspal yang dapat

ditambahkan dalam campuran menjadi sedikit. Kadar aspal yang optimal akan memberikan nilai stabilitas yang maksimum.

2. Kohesi, adalah gaya ikat aspal yang berasal dari daya lekatnya, sehingga mampu memelihara tekanan kontak antar butir agregat. Daya kohesi terutama ditentukan oleh penetrasi aspal, perubahan viskositas akibat temperatur, tingkat pembebanan, komposisi kimiawi aspal, efek dari waktu dan umur aspal.

### 3.6.2 Keawetan (*Durability*)

Durabilitas adalah kemampuan beton aspal menerima repetisi beban lalu lintas seperti berat kendaraan dan 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 pori dalam campuran, kepadatan dan kedap airnya campuran. Selimut aspal yang tebal akan membungkus agregat secara baik, beton aspal akan lebih kedap air, sehingga kemampuannya menahan keausan semakin baik. Tetapi semakin tebal selimut aspal, maka semakin mudah terjadi *bleeding* yang mengakibatkan jalan semakin licin. Besarnya pori yang tersisa dalam campuran setelah pemadatan, mengakibatkan durabilitas beton aspal menurun. Semakin besar pori yang tersisa semakin tidak kedap air dan semakin banyak udara di dalam beton aspal, yang menyebabkan semakin mudahnya selimut aspal beroksidasi dengan udara dan menjadi getas, dan durabilitasnya menurun.

Durabilitas juga merupakan salah satu parameter kinerja campuran beton aspal yang berkaitan dengan keawetan campuran perkerasan terhadap pengaruh air dan temperatur dalam waktu yang lama (Djalante, 2011). Pengujian perendaman *Marshall* adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh air terhadap campuran perkerasan aspal. Stabilitas benda uji ditentukan setelah satu hari perendaman di dalam air pada suhu 60°C. Menurut Departemen Pekerjaan Umum (2007), syarat minimum indeks kekuatan sisa untuk lalulintas adalah sebesar 80 %. Campuran aspal-agregat dengan indeks perendaman yang semakin besar dapat menyebabkan tingkat durabilitas campuran semakin besar. *Asphalt Institute*, MS-2 (1983) merekomendasikan bahwa indeks stabilitas sisa pada perendaman 24 jam

harus lebih besar dari 75 %, sedangkan Bina Marga 2010 merekomendasikan agar lebih dari 90%.

### **3.6.3 Kelenturan (*Flexibility*)**

Fleksibilitas pada lapisan perkerasan adalah kemampuan lapisan untuk dapat mengikuti deformasi yang terjadi akibat beban lalu lintas berulang tanpa timbulnya retak dan perubahan volume. Fleksibilitas kemampuan beton aspal menyesuaikan diri akibat penurunan dan pergerakan pondasi atau tanah dasar tanpa terjadi retak, yaitu dengan cara berikut ini.

1. Penggunaan agregat bergradasi senjang sehingga diperoleh nilai *VMA* yang besar.
2. Penggunaan aspal lunak berpenetrasi tinggi.
3. Penggunaan aspal yang cukup banyak agar diperoleh *VIM* yang tinggi.

### **3.6.4 Ketahanan Lelah (*Fatigue Resistance*)**

Ketahanan kelelahan merupakan ketahanan lapis aspal beton dalam menerima beban berulang tanpa terjadinya kelelahan yang berupa alur dan retak. Ketahanan terhadap kelelahan dipengaruhi oleh rongga antar campuran yang tinggi dan kadar aspal yang rendah akan mengakibatkan kelelahan yang cepat, sedangkan rongga antar butiran agregat dan kadar aspal yang tinggi dapat mengakibatkan lapis perkerasan menjadi fleksibel.

### **3.6.5 Tahanan Geser (*Skid Resistance*)**

Tahanan geser adalah kemampuan permukaan beton aspal terutama pada kondisi basah, memberikan gaya gesek pada roda kendaraan sehingga kendaraan tidak tergelincir ataupun slip. Faktor-faktor untuk mendapatkan kekesatan jalan sama dengan untuk mendapatkan stabilitas yang tinggi, yaitu kekasaran permukaan agregat, luas bidang kontak antar butir, gradasi agregat, kepadatan campuran, dan tebal film aspal. Ukuran maksimum butir agregat ikut menentukan kekesatan permukaan. Dalam hal ini agregat yang digunakan tidak saja harus mempunyai permukaan yang kasar, tetapi juga mempunyai daya tahan untuk permukaannya tidak mudah menjadi licin akibat repetisi kendaraan.

### 3.6.6 Kedap Air (*Impermeability*)

Impermeabilitas adalah kemampuan beton aspal untuk tidak dapat dimasuki air ataupun udara kadalam lapisan beton aspal. Air dan udara dapat mengakibatkan percepatan proses penuaan aspal, dan pengelupasan film/selimut aspal dari permukaan agregat. Jumlah pori yang tersisa setelah beton aspal dipadatkan dapat menjadi indikator kekedapan air campuran. Tingkat impermeabilitas beton aspal berbanding terbalik dengan tingkat durabilitasnya.

### 3.6.7 Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*)

*Workability* adalah kemampuan campuran beton aspal untuk mudah dihamparkan dan dipadatkan. Tingkat kemudahan dalam pelaksanaan, menentukan tingkat efisiensi pekerjaan. Faktor yang mempengaruhi tingkat kemudahan dalam proses penghamparan dan pepadatan adalah viskositas aspal, kepekaan aspal terhadap perubahan temperatur, dan gradasi serta kondisi agregat. Revisi atau koreksi terhadap rancangan campuran dapat dilakukan jika ditemukan kesukaran dalam pelaksanaan.

## 3.7 Perhitungan Sifat Volumetrik Campuran Beton Aspal

Sifat volumetrik beton aspal padat dapat diketahui dengan menggunakan beberapa parameter (Sukirman, 2003). Di antaranya adalah berat jenis *bulk* ( $G_{mb}$ ), berat jenis maksimum ( $G_{mm}$ ), pori dalam agregat campuran ( $VMA$ ), volume pori dalam beton aspal ( $VIM$ ), volume pori antar butir agregat ( $VFWA$ ), dan kepadatan (*Density*) yang dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.1 sampai dengan 3.8 berikut ini.

### 3.7.1 Berat Jenis Bulk Beton Aspal Padat ( $G_{mb}$ )

Berat jenis *bulk* beton aspal padat adalah berat jenis campuran beton aspal dengan pori/udara, diukur dengan menggunakan hukum Archimedes pada Persamaan 3.1 berikut ini.

$$G_{mb} = \frac{Bk}{B_{ssd} - B_a} \quad (3.1)$$

dengan:

$G_{mb}$  = Berat jenis *bulk* dari beton aspal padat,

$B_k$  = Berat kering beton aspal padat (gram),

$B_{ssd}$  = Berat kering permukaan beton aspal yang telah dipadatkan (gram),

$B_a$  = Berat beton aspal padat di dalam air (gram), dan

$B_{ssd} - B_a$  = Volume *bulk* dari beton aspal padat, jika berat jenis air diasumsikan sama dengan 1.

### 3.7.2 Berat Jenis *Bulk* Efektif Agregat ( $G_{se}$ )

Berat jenis efektif agregat adalah berat jenis dari agregat termasuk seluruh rongga pori dalam partikel agregat, tidak termasuk rongga pori yang menyerap atau terisi oleh aspal dengan menggunakan Persamaan 3.2 berikut ini.

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{P_{mm} + P_b}}{\frac{G_{mm} + G_b}} \quad (3.2)$$

dengan:

$G_{se}$  = berat jenis efektif agregat,

$G_{mm}$  = berat jenis maksimum campuran aspal tidak dipadatkan,

$P_{mm}$  = persen berat dari campuran total yang tidak dipadatkan = 100%, dan

$G_b$  = berat jenis aspal.

### 3.7.3 Berat Jenis Maksimum Beton Aspal yang Belum Dipadatkan ( $G_{mm}$ )

Berat jenis maksimum beton aspal yang belum dipadatkan adalah berat jenis campuran beton aspal tanpa pori/ udara, menggunakan prosedur *AASHTO* T209-90 dengan menggunakan Persamaan 3.3 berikut ini.

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_a}{G_a}} \quad (3.3)$$

dengan:

$G_{mm}$  = Berat jenis maksimum dari campuran beton aspal yang belum dipadatkan,

$P_a$  = Kadar aspal terhadap berat beton aspal padat (%),

- $P_s$  = Kadar agregat terhadap berat beton aspal padat (%),  
 $G_a$  = Berat jenis aspal, dan  
 $G_{se}$  = Berat jenis efektif dari agregat pembentuk beton aspal padat.

#### 3.7.4 Void in Mineral Aggregate (VMA)

VMA adalah banyak pori/udara yang berada di antara butir-butir agregat dalam beton aspal padat. Hasil dari VMA dinyatakan dalam persentase. VMA dapat meningkat jika selimut aspal lebih tebal, atau agregat yang digunakan bergradasi terbuka. VMA dinyatakan dalam persentase terhadap volume beton aspal padat. Perhitungan dilakukan berdasarkan volume beton aspal padat = 100 cm<sup>3</sup>. Nilai VMA dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.4 berikut ini.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}} \quad (3.4)$$

dengan:

- $VMA$  = Volume pori antara agregat di dalam beton aspal padat, % dari volume *bulk* beton aspal padat,  
 $G_{mb}$  = Berat jenis *bulk* dari beton aspal padat,  
 $P_s$  = Kadar agregat, % terhadap berat beton aspal padat, dan  
 $G_{sb}$  = Berat jenis *bulk* dari agregat pembentuk beton aspal padat.

#### 3.7.5 Void in Mix (VIM)

VIM adalah sisa dari volume pori/udara yang terjadi setelah campuran beton aspal dipadatkan. VIM berfungsi sebagai tempat bergesernya butir-butir agregat, akibat pemadatan tambahan yang terjadi oleh repetisi beban lalu lintas, atau tempat jika aspal menjadi lunak akibat meningkatnya temperatur. VIM dinyatakan dalam persentase terhadap volume beton aspal padat. Perhitungan dilakukan berdasarkan volume beton aspal padat = 100 cm<sup>3</sup>. Nilai VIM dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.5 berikut ini.

$$VIM = 100 - \frac{G_{mm} \cdot G_{mb}}{G_{mm}} \quad (3.5)$$

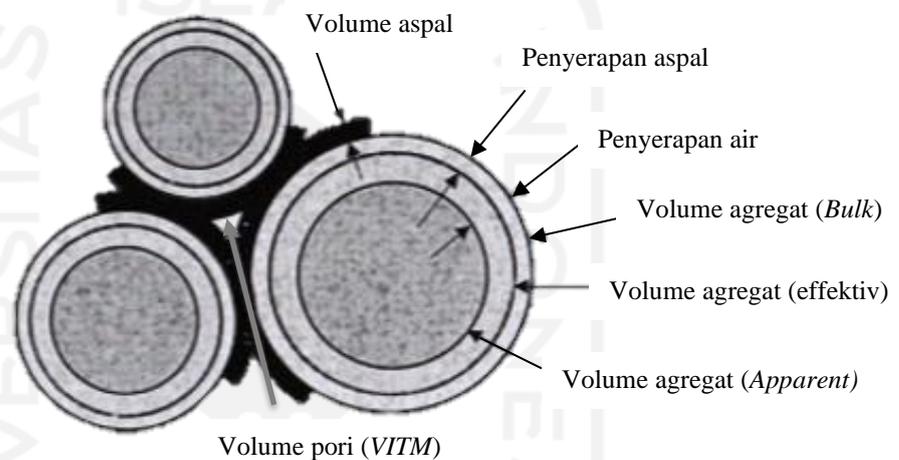
dengan:

$VIM$  = Volume pori dalam beton aspal padat, % dari volume bulk beton aspal padat,

$G_{mm}$  = Berat jenis maksimum dari beton aspal yang belum dipadatkan, dan

$G_{mb}$  = Berat jenis bulk dari beton aspal padat.

Untuk ilustrasi  $VMA$  dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut ini.



**Gambar 3.4 Ilustrasi  $VMA$ ,  $Voids$ , dan Kadar Bitumen Efektif**

(Sumber: Subarkah, 2015)

### 3.7.6 Volume of Void Filled with Asphalt (VFWA)

$VFWA$  adalah volume pori/udara beton aspal padat yang terisi oleh aspal. Aspal yang mengisi  $VFWA$  berfungsi menyelimuti butir-butir agregat di dalam beton aspal padat.  $VFWA$  adalah persentase volume beton aspal padat yang menjadi selimut aspal. Perhitungan dilakukan berdasarkan volume beton aspal padat = 100  $cm^3$ . Nilai  $VFWA$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.6 berikut ini.

$$VFWA = \frac{100(VMA - VIM)}{VMA} \quad (3.6)$$

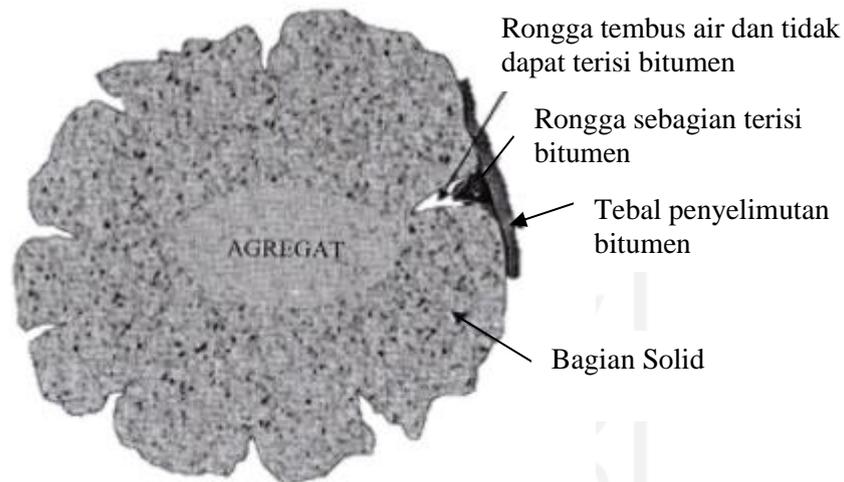
dengan :

$VFWA$  = Volume pori antara butir agregat yang terisi aspal, % dari  $VMA$ ,

$VMA$  = Volume pori antara butir agregat di dalam beton aspal padat, % dari volume bulk beton aspal padat, dan

$VIM$  = Volume pori dalam beton aspal padat, % dari volume bulk beton aspal padat.

Untuk ilustrasi  $VMA$  dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut ini.



**Gambar 3.5 Ilustrasi Rongga Agregat yang Terisi Bitumen**

(Sumber: Subarkah, 2015)

### 3.7.7 Kepadatan (*Density*)

Nilai *density* adalah merupakan nilai berat volume yang menunjukkan kepadatan campuran agregat aspal. Campuran dengan nilai *density* yang tinggi akan mampu menahan beban yang lebih baik, hal ini disebabkan rongga di dalam campuran semakin mengecil dan butiran agregat akan memiliki bidang kontak yang luas sehingga gaya gesek (*friction*) antar butiran semakin besar dan juga menimbulkan kedekatan campuran terhadap udara dan air, sehingga akan sulit teroksidasi. Nilai *density* dapat diperoleh dari Persamaan 3.7 dan 3.8 berikut ini.

$$g = \frac{e}{d-1} \quad (3.7)$$

$$f = d - e \quad (3.8)$$

dengan:

$g$  = 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 (cm<sup>3</sup>).

### 3.8 Karakteristik Pengujian *Marshall* (*Marshall Test*)

Salah satu metode yang bertujuan untuk menghasilkan design yang baik adalah *Marshall Test*. Metode ini dikembangkan oleh Bruce *Marshall* dari Misisipi *State Highway Department* sekitar tahun 1940-an dibuat standard dalam *ASTM D 1559-89* yang membuat beberapa benda uji dengan kadar aspal berbeda kemudian di tes kadar udara (*porosity*), *stability*, dan *flow*. Hasil tes di plot terhadap kadar *bitumen*, kemudian kadar optimum bitumen dipilih, proses ini mengukur secara teliti : *porosity*, *stability*, *flow*, sehingga didapatkan sifat aspal yang awet dan tahan terhadap *rutting* (penurunan) serta *fatigue* (retak karena lelah).

Pengujian *Marshall* terdiri dari alat tekan yang dilengkapi dengan *proving ring* (cincin penguji) berkapasitas 22,2 kN atau 5000 lbf serta *flowmeter* untuk mengukur kelelahan plastis atau *flow*. Benda uji *Marshall* berbentuk silinder dengan diameter 4 inci atau 10,2 cm dan tinggi 2,5 inci atau 6,35 cm (Sukirman, 2003).

#### 3.8.1 Perhitungan Nilai Stabilitas dan Kelelahan (*Flow*)

Benda uji dipanaskan terlebih dulu selama 30 menit dengan suhu 60°C di dalam *waterbath* untuk mendapatkan temperatur benda uji sesuai dengan temperatur terpanas di lapangan. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan benda uji di alat *Marshall* dengan pemberian beban ke benda uji dengan kecepatan 2 inci/ menit atau 51 mm/ menit. Beban pada saat terjadi keruntuhan dibaca pada arloji pengukur dari *proving ring*, deformasi yang terjadi pada saat itu merupakan nilai *flow* yang dapat dibaca pada *flowmeter*nya. Nilai stabilitas didapatkan untuk mengukur ketahanan benda uji terhadap beban. Sedangkan *flow* meter didapatkan untuk mengukur besarnya deformasi yang terjadi akibat beban. Nilai stabilitas merupakan nilai arloji pengukur dikalikan dengan nilai kalibrasi *proving ring*, dan dikoreksi dengan angka koreksi akibat variasi ketinggian benda uji (Sukirman, 2003). Rumus untuk menghitung nilai stabilitas dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.9 berikut ini.

$$q = p \times q \quad (3.9)$$

dengan:

q = Nilai stabilitas,

p = Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi proving ring, dan

q = Angka koreksi benda uji.

### 3.8.2 Perhitungan *Marshall Quotient (MQ)*

*Marshall Quotient* adalah perbandingan antara stabilitas dengan kelelahan plastis (*flow*) yang digunakan sebagai pendekatan terhadap tingkat kekakuan campuran (Djalante, 2011). Campuran aspal yang memiliki stabilitas tinggi dan kelelahan plastis yang rendah akan menghasilkan nilai *MQ* yang tinggi, sehingga campuran tersebut kaku dan perkerasan tersebut mudah mengalami perubahan bentuk jika menerima beban lalu lintas. Sedangkan campuran aspal dengan stabilitas yang rendah dan kelelahan plastis yang tinggi akan menghasilkan *MQ* yang rendah, sehingga cenderung plastis dan tidak stabil (Muaya, 2015). Nilai *MQ* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.10 berikut ini.

$$MQ = \frac{q}{r} \quad (3.10)$$

dengan :

*MQ* = Nilai *Marshall Quotient* (kg/mm),

q = Nilai stabilitas (kg), dan

r = Nilai kelelahan plastis/ *flow* (mm).

### 3.9 Pengujian Perendaman (*Immersion Test*)

*Immersion Test* merupakan suatu pengujian yang bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik dari campuran akibat pengaruh air, suhu, dan cuaca. Pada *Immersion Test* perendaman benda uji dilakukan dengan 2 kondisi berbeda yaitu dalam *waterbath* pada suhu 60° C selama 30 menit (stabilitas standar) dan direndam pada suhu 60° C selama 24 jam (stabilitas rendaman). Pada pengujian *Immersion Test* ditemui istilah *Index or Retained Strength (IRS)*, yang dimana *IRS* tersebut merupakan nilai stabilitas *Marshall* sisa untuk mengukur daya tahan terhadap

pengerusakan oleh air. Nilai *Index or Retained Strength (IRS)* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 3.11 berikut ini.

$$\text{Index or Retained Strength} = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (3.11)$$

dengan:

$S_1$  = rata – rata nilai stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 30 menit (kg),

$S_2$  = rata – rata nilai stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam (kg).

### 3.10 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

*Indirect Tensile Strength (ITS)* merupakan suatu metode pengujian yang bertujuan untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal. Pada penerapannya di lapangan, nilai *ITS* ini digunakan untuk memperkirakan keretakan akibat kegagalan gaya tarik, sehingga mempermudah dalam proses mengevaluasi potensi retakan pada campuran aspal.

Pengujian *ITS* dilakukan dengan cara membebani sebuah sampel silinder dengan sebuah beban (*dial*) diletakkan di atasnya yang bekerja sejajar dan sepanjang bidang vertikal. Pembebanan ini menghasilkan kuat tarik yang relatif merata sepanjang diameter bidang vertikal, yang mana akan menyebabkan silinder akan mengalami kerusakan yaitu terjadinya keretakan sepanjang diameter vertikal.

Pengujian kuat tarik tidak langsung (*ITS*) dikatakan tidak langsung karena tidak diuji dengan pembebanan tarik secara langsung. Tetapi dihitung dari pembebanan maksimum dimana dilakukan pembebanan tekan yang dilakukan secara terus menerus dengan laju konstan sampai mencapai beban maksimum (Zachraini, 2012). Nilai *ITS* dapat diperoleh dari Persamaan 3.12 berikut ini.

$$ITS = \frac{P_{maks} \times A_0}{h \times d} \quad (3.12)$$

dengan:

*ITS* = kuat tarik tidak langsung ( $\text{kg/cm}^2$ ),

$P_{maks}$  = beban puncak (kg),

$h$  = tinggi sampel (cm),

- $d$  = diameter sampel (cm), dan  
 $A_0$  = konstanta (tabel  $A_0$  terlampir pada lampiran).

### 3.11 Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)*

Pengujian tarik tak langsung yang dihasilkan dari variasi perendaman atau *Tensile Strength Ratio (TSR)* adalah suatu metode untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal beton yang telah direndam dengan variasi perendaman tertentu. Nilai *TSR* dapat menggambarkan perkiraan kerentanan campuran terhadap air dan suhu. Potensi kerusakan terhadap air diindikasikan dengan perbandingan antara nilai *ITS conditioned* (perendaman) dengan *unconditioned* (tanpa perendaman). Angka *Tensile Strength Ratio* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 3.13 berikut ini.

$$TSR = \frac{ITS_n}{ITS_0} \times 100 \quad (3.13)$$

dengan:

$TSR$  = Angka *Tensile Strength Ratio* ( $\text{kg/cm}^2$ ),

$ITS_0$  = kuat tarik tidak langsung awal ( $\text{kg/cm}^2$ ), dan

$ITS_n$  = kuat tarik tidak langsung dengan durasi perendaman.

### 3.12 Pengujian *Cantabro (Cantabro Test)*

*Cantabro Test* merupakan suatu metode untuk mengetahui ketahanan campuran aspal terhadap pengaruh beban lalu lintas yang berulang ulang yang akan menyebabkan perkerasan menjadi aus dan mengalami penurunan kekuatan. Pengujian ini menggunakan mesin *Los Angeles* dengan kondisi benda uji yang telah dipadatkan kedua sisinya sebanyak  $2 \times 75$  tumbukan. Kemudian benda uji diletakkan dalam drum *Los Angeles* tanpa bola dan diputar sebanyak 300 putaran. Nilai *Cantabro Loss* dapat diperoleh dari Persamaan 3.14 berikut ini.

$$L = \left( \frac{a-b}{a} \right) \times 100 \quad (3.14)$$

dengan:

$a$  = Berat sampel sebelum di uji (gr),

$b$  = Berat sampel setelah di uji (gr), dan

$L$  = Persentase kehilangan berat (%).

### 3.13 Perhitungan Indeks Penetrasi ( $PI$ )

Aspal bersifat viscos-elastik yaitu menjadi lebih keras bila temperatur turun dan melunak bila temperatur meningkat. Kepekaan aspal untuk berubah sifat akibat perubahan temperatur ini dikenal sebagai kepekaan aspal terhadap temperatur. Laju perubahan viskositas atau konsistensi aspal oleh perubahan temperatur pada setiap *bitumen* berbeda-beda, bergantung pada asal *bitumen*, tipe *bitumen*, dan metode pemrosesan *bitumen*. Semakin besar perubahan viskositas bitumen oleh setiap derajat kenaikan temperatur, maka semakin peka *bitumen* tersebut terhadap temperatur. Salah satu metode untuk mengukur kepekaan *bitumen* terhadap perubahan temperatur adalah *Penetration Index (PI)*. Nilai  $PI$  pada dasarnya ditentukan oleh dua nilai penetrasi pada temperatur yang berbeda. Pfeiffer dan Van Doornal mengembangkan parameter kepekaan *bitumen* dengan *Penetration Index (PI)* seperti Persamaan 3.15 dan Persamaan 3.16 berikut ini.

$$PI = \frac{20(1-25A)}{1+50A} \quad (3.15)$$

dengan:

$A$  = Garis hubung antara perubahan penetrasi (dalam skala log) dan perubahan temperature yang terkait (dalam skala normal)

$PI$  = Indeks Penetrasi

Nilai  $PI$  berkisar antara -3 (kepekaan tinggi) sampai +7 (kepekaan rendah). Nilai  $PI$  dan  $A$  dapat diturunkan dari pengukuran nilai penetrasi *bitumen* yang diukur pada dua temperatur ( $T_1$  dan  $T_2$ ) yang berbeda, seperti pada Persamaan 3.16 berikut ini.

$$A = \frac{\text{Log Penetrasi pada } T_2 - \text{Log } 800}{T_1 - T_2} \quad (3.16)$$

dengan:

$T_1$  = Temperatur keadaan 1 (Temperatur saat penetrasi = 25°C), dan

$T_2$  = Temperatur keadaan 2 (Temperatur saat *Softening point*).

### 3.14 Perhitungan Modulus Kekakuan

Suatu campuran perkerasan terdiri dari beberapa material penyusun, seperti aspal sebagai bahan ikat dan agregat sebagai material utama pada lapis perkerasan. Setiap unsur tersebut mempunyai *stiffness* yang berbeda sesuai dengan unsur penyusun dan pengolahan bahan tersebut. Berikut contoh perhitungan modulus kekakuan pada aspal dan campuran

#### 1. Modulus Kekakuan Bitumen ( $S_{bit}$ )

Kekakuan *bitumen* dinyatakan dalam besarnya nilai modulus atau disebut dengan modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ). Kekakuan *bitumen* ditentukan oleh empat parameter, yaitu: lama pembebanan (*loading time*) oleh roda kendaraan, temperatur permukaan perkerasan, temperatur pada *softening point*, dan *penetration index* ( $PI$ ). Lama pembebanan dihitung berdasarkan kecepatan kendaraan dan panjang tapak kontak kendaraan dengan permukaan jalan searah laju kendaraan.

Dalam parameter perhitungan *stiffness modulus of bitumen* di butuhkan beberapa data seperti lama pembebanan (*loading time*) oleh roda kendaraan, temperatur permukaan perkerasan, temperatur pada *softening point*, dan *penetration index* ( $PI$ ). Nilai  $S_{bit}$  dapat diperoleh dari Persamaan 3.17 dan Persamaan 3.18 berikut ini.

#### a. Menghitung lama pembebanan (*time of loading*)

$$\frac{L}{V} = \frac{a}{b} \quad (3.17)$$

dengan:

$a$  = Panjang tapak kontak ban dengan perkerasan (m),

$b$  = Kecepatan kendaraan (m/s), dan

$\frac{L}{v}$  = Lama pembebanan (s).

b. Selisih temperatur

$$f = c - d \quad (3.18)$$

dengan:

$c$  = Titik lembek aspal ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$d$  = Temperatur perkerasan Indonesia ( $^{\circ}\text{C}$ ), dan

$f$  = Selisih Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Besaran nilai modulus kekakuan *bitumen* diperoleh melalui nomogram Vander Poel. Garis yang menghubungkan titik lama pembebanan dan selisih temperatur kemudian berpotongan dengan garis *PI* aspal. Selanjutnya diperoleh  $S_{bit}$  pada aspal. Namun untuk nilai  $S_{bit}$  pada nomogram *stiffnes* modulus campuran ( $S_{mix}$ ) minimal  $\geq 5 \times 10^6$  sehingga nilai  $S_{bit}$  pada masing-masing bahan ikat ditambahkan +2.

2. Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ )

Kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) menggambarkan kemampuan campuran perkerasan dalam mendukung beban atau disebut sebagai kapasitas dukung perkerasan dalam menahan beban roda kendaraan. Besarnya nilai  $S_{mix}$  ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu:  $S_{bit}$ , konsentrasi volume agregat padat ( $C_v$ ), konsentrasi volume *bitumen* ( $C_b$ ), dan konsentrasi rongga dalam campuran agregat dan *bitumen*.

Rancangan campuran dilakukan dengan perbandingan berat agregat dan *bitumen*. Dalam menghitung modulus kekakuan campuran digunakan perbandingan volume antara bitumen, agregat, dan *voids* (pori) dalam satuan %. Untuk itu perlu dilakukan konversi dari persentase perbandingan berat menjadi persentase perbandingan volume dari Persamaan 3.19 sampai dengan Persamaan 3.22 berikut ini.

a. Menghitung berat dan volume pada *bitumen*

$$G_{bit} = \frac{P_{bit}}{100} \times 1200 \quad (3.19)$$

$$V_{bit} = \frac{G_{bit}}{1,038} \quad (3.20)$$

dengan:

$P_{bit}$  = Kadar aspal (%),

$G_{bit}$  = Berat *bitumen* (gram), dan

$V_{bit}$  = Volume *bitumen* (cc).

b. Menghitung berat dan volume pada agregat

$$G_{agr} = \frac{G_{bit}}{100} \times 1200 \quad (3.21)$$

$$V_{agr} = \frac{G_{agr}}{1,038} \quad (3.22)$$

dengan:

$G_{agr}$  = Kadar aspal (%),

$G_{bit}$  = Berat *bitumen* (gram), dan

$V_{agr}$  = Volume *bitumen* (cc).

Kemudian setelah mendapatkan berat dan volume pada agregat dan aspal. Dalam grafik nomogram  $S_{mix}$  didasarkan pada perbandingan volume. Untuk itu, hasil hitungan yang merupakan proporsi berat di konversi ke dalam proporsi volume. Konversi hitungan persentase volume agregat dan *bitumen* dapat di hitung dari Persamaan 3.23 dan Persamaan 3.24 berikut ini.

c. Konversi persentase volume agregat, *bitumen*, dan *voids*

$$\% \text{ Volume } bitumen = \frac{V_{bit}}{V_{bit}+V_{agr}} \times (100 - VITM) \times 100\% \quad (3.23)$$

$$\% \text{ Volume agregat} = \frac{V_{agr}}{V_{bit}+V_{agr}} \times (100 - VITM) \times 100\% \quad (3.24)$$

dengan:

$V_{bit}$  = Volume bitumen (cc),

$V_{agr}$  = Volume bitumen (cc), dan

$VITM$  = Volume pori (%).

Kemudian dilakukan penggambaran pada nomogram dan didapatkan nilai  $S_{mix}$  pada campuran beton aspal.



## **BAB IV METODE PENELITIAN**

### **4.1 Metode Penelitian**

Metode penelitian adalah metode yang dilakukan dalam rangka untuk mengumpulkan informasi atau data serta melakukan investigasi terhadap data yang telah didapatkan tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah metode eksperimental, yaitu metode yang dilakukan dengan melaksanakan serangkaian kegiatan percobaan untuk mendapatkan data. Data tersebut 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 kepada peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) 8129:2015.

### **4.2 Metode Pengambilan Sampel**

Metode pengambilan sampel pada penelitian tugas akhir ini adalah *nonprobability sampling*, yaitu jenis sampel tidak dipilih secara acak. *Non-probability sampling* yang digunakan adalah *purposive sampling*, yaitu sampel yang diambil berdasarkan tujuan. Perlu diperhatikan dalam penelitian ini bahwa sampel yang digunakan disesuaikan dengan kriteria tertentu yang sudah ditentukan berdasarkan tujuan penelitian. Penelitian ini menggunakan dua metode pencampuran, yaitu metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap. Aspal yang digunakan adalah Pertamina Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dari PT Bintang Djaja, Cilacap.

### **4.3 Metode Pengambilan Data**

Pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan selama pengujian. Untuk mempermudah pengambilan data, maka dilakukan pengelompokan benda uji sehingga didapatkan data berupa nilai stabilitas, *flow*, *MQ*, *VIM*, *VMA*, *VFWA*, nilai *IRS*, nilai *ITS*, nilai *TSR*, dan nilai *Cantabro Loss*.

#### 4.4 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Tahapan penelitian ini meliputi persiapan material, pemeriksaan material, persiapan alat, pembuatan benda uji, *Marshall Test*, *Immersion Test (IRS)*, *Indirect Tensile Strength Test (ITS)*, *Tensile Strenght Ratio (TSR)*, dan *Cantabro Test*. Tahap penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut ini.

##### 4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material

Pembuatan benda uji campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dalam penelitian tugas akhir ini menggunakan material agregat dan dua jenis aspal, yaitu aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*. Serat selulosa yang digunakan adalah berupa dedak padi tetapi tidak dilakukan pengujian, karena mengacu pada hasil penelitian terdahulu. Pemeriksaan material dilakukan untuk mengetahui kelayakan material telah memenuhi spesifikasi yang digunakan atau belum. Pemeriksaan material berpedoman pada SNI 8129:2015 dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Pengujian untuk agregat dan aspal adalah sebagai berikut.

##### 1. Pengujian Agregat

- a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar mengacu pada SNI 1969 : 2008.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis (*bulk*), berat kering permukaan jenuh atau *Saturated Surface Dry (SSD)* dan berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*), serta penyerapan air oleh agregat kasar.

- b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus mengacu pada SNI 1970:2008.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis (*bulk*), berat kering permukaan jenuh atau *Saturated Surface Dry (SSD)* dan berat jenis semu (*apparent Specific Gravity*), serta penyerapan air oleh agregat halus.

- c. Pengujian kelekatan agregat oleh aspal mengacu pada SNI 06-2439-1991.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kelekatan agregat terhadap aspal. Kelekatan agregat terhadap aspal adalah persentase luas permukaan batuan

yang tertutup aspal terhadap keseluruhan luas permukaan.

d. Pengujian analisa saringan

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dan kasar dengan menggunakan saringan.

e. Pengujian *Sand Equivalent* mengacu pada SNI 3423 : 2008.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kadar debu atau lumpur atau bahan yang mempunyai lempung pada tanah atau agregat halus.

f. Pengujian keausan agregat mengacu pada SNI-2417 : 2008.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan ketahanan agregat kasar terhadap keausan/abrasi dengan menggunakan mesin *Los Angels*.

2. Pengujian Bahan Pengisi (*Filler*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis masing-masing *filler* abu batu.

3. Pengujian Aspal

Pada penelitian ini bahan ikat yang digunakan adalah aspal Pertamina Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*. Aspal yang akan digunakan dalam penelitian ini dilakukan pengujian terlebih dahulu agar kualitas aspal yang akan digunakan harus sesuai dengan persyaratan SNI 8129:2015 dan Bina Marga SKh-2.6.3.2:2018. Pengujian yang akan dilakukan antara lain:

a. Pengujian penetrasi aspal mengacu pada SNI 06-2456-1991.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal (*solid* atau *semi solid*), dengan memasukkan jarum kemudian dibebani dengan berat dan waktu tertentu kedalam aspal pada suhu tertentu. Peralatan yang digunakan adalah alat penetrasi yang dapat menggerakkan pemegang jarum naik turun tanpa gesekan dan dapat mengukur penetrasi sampai 0,1 mm, pemberat, jarum penetrasi, cawan, bak perendam (*waterbath*).

b. Pengujian berat jenis aspal mengacu pada SNI 06-2441-1991.

Berat jenis aspal adalah perbandingan antara berat aspal dengan berat air suling dengan volume yang sama pada suhu tertentu. Peralatan dan cara pengujian untuk menentukan berat jenis aspal padat dengan menggunakan alat piknometer.

- c. Pengujian titik lembek mengacu pada SNI 06-2434-1991.  
Pengujian ini bertujuan untuk menentukan temperatur aspal pada saat mulai mengalami kelembekan atau mencapai tingkat *viskositas* yang rendah. Hal ini dapat diketahui dengan melihat suhu pada saat bola baja dengan berat tertentu mendesak aspal sehingga aspal tersebut menyentuh plat dasar yang terletak di bawah cincin pada ketinggian tertentu sebagai akibat kecepatan pemanasan tertentu.
- d. Pengujian daktilitas mengacu pada SNI 06-2432-1991.  
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kohesi aspal. Pemeriksaan ini dilakukan dengan cara mengukur jarak terpanjang aspal apabila aspal diletakkan pada dua cetakan yang berada pada suhu 25°C kemudian ditarik dengan kecepatan 25 mm/detik sampai aspal itu putus.
- e. Pengujian kelarutan dalam Karbon Tetra Klorida atau *Trichloroethylene* (TCE) mengacu pada SNI 06-2438-2015.  
Pengujian ini bertujuan untuk menentukan jumlah aspal yang larut dalam Karbon Tetra Klorida. Pada pengujian ini akan mengetahui kemurnian aspal terhadap bahan lainnya.
- f. Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar mengacu pada SNI 06-2433-1991.  
Pengujian ini bertujuan untuk menentukan suhu pada saat terjadi nyala singkat pada suatu titik di atas permukaan aspal. Sedangkan titik bakar bertujuan untuk menentukan suhu pada saat di mana aspal terlihat terbakar singkat pada suatu titik di atas permukaan aspal.

#### 4.4.2 Persiapan Alat

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia (UII), Yogyakarta. Berikut alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Peralatan pengujian fisik agregat, seperti mesin *Los Angeles*, saringan standar, *vibrator*, dan tabung *sand equivalent*.
2. Peralatan pengujian fisik aspal, seperti alat ukur penetrasi aspal, daktilitas aspal, kelarutan aspal, titik lembek aspal, titik nyala dan titik bakar aspal.

3. Cetakan benda uji berbentuk silinder ( *mold* ) berdiameter 10 cm (4") dan tinggi 7,5 cm (3") dilengkapi dengan pela tatas dan leher sambung.
4. Alat tekan  *Marshall Test*  yang terdiri sebagai berikut.
  - a. Kepala penekan yang berbentuk lengkung ( *breaking head* ),
  - b. Cincin penguji yang berkapasitas 2500 kg (5000  *pound* ). dengan ketelitian 12,5 kg (25  *pound* ) dilengkapi arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm (0,0001"),
  - c. Arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm (0,0001"),
  - d. Arloji penunjuk kelelahan dengan ketelitian 0,25 mm (0,01") dengan perlengkapannya.
5.  *Oven* , alat untuk memanaskan bahan yang dilengkapi dengan pengatur suhu untuk memanasi sampai  $(200 \pm 3) ^\circ\text{C}$ .
6.  *Ejector* , alat untuk mengeluarkan benda uji yang telah dipadatkan dari cetakan.
7.  *Compactor* , alat penumbuk yang mempunyai permukaan tumbuk rata berbentuk silinder dengan berat 4,536 kg (10  *pound* ) dan tinggi jatuh beban 45,7 cm (18").
8. Bak perendam ( *waterbath* ), dilengkapi dengan pengatur suhu minimum  $20^\circ\text{C}$ .
9. Timbangan yang dilengkapi penggantung uji berkapasitas 2 kg dengan ketelitian 0,1 gram, timbangan berkapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gram, dan timbangan digital.
10. Alat uji  *Indirect Tensile Strength Test (ITS)*  dan  *Tensile Strength Ratio (TSR)* , yang meliputi:
  - a. Alat ukur tekan ( *strip loading* ) selebar 0,5",
  - b. Arloji pengukuran stabilitas dan  *flow*  dengan ketelitian 0,25 mm.
11. Seperangkat mesin  *Los Angeles*  untuk uji  *Cantabro* , yang terdiri dari silinder baja tertutup pada kedua sisinya dengan diameter 71 cm panjang dalam 50 cm. Silinder bertumpu pada dua poros pendek yang tak menerus dan berputar pada poros mendatar. Silinder berlubang untuk memasukan benda uji. Penutup lubang terpasang rapat sehingga permukaan dalam silinder tidak terganggu. Di bagian dalam silinder terdapat bilah baja melintang penuh setinggi 8,9 cm.

12. Peralatan penunjang lainnya adalah kompor, wajan, spatula, sarung tangan karet, gelas ukur, panci, kain lap, bak plastik, jangka sorong, termometer, ember dan lain-lain.

#### 4.4.3 Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah agregat dan aspal yang diuji terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai campuran *Stone Matrix Asphalt* 12,5 mm. Hal ini dilakukan guna mengetahui sifat-sifat material tersebut apakah telah memenuhi persyaratan atau belum sehingga dapat mendapatkan campuran aspal yang baik.

Setelah melakukan pengujian sifat fisik agregat dan aspal, selanjutnya yaitu dilakukan penyaringan agregat menggunakan saringan standar. Gradasi agregat penyusun campuran *Stone Matrix Asphalt* adalah gradasi senjang (*gap graded*) yang didominasi oleh agregat kasar.

Pembuatan campuran SMA 12,5 mm menurut SNI 8129:2015 adalah sebagai berikut ini.

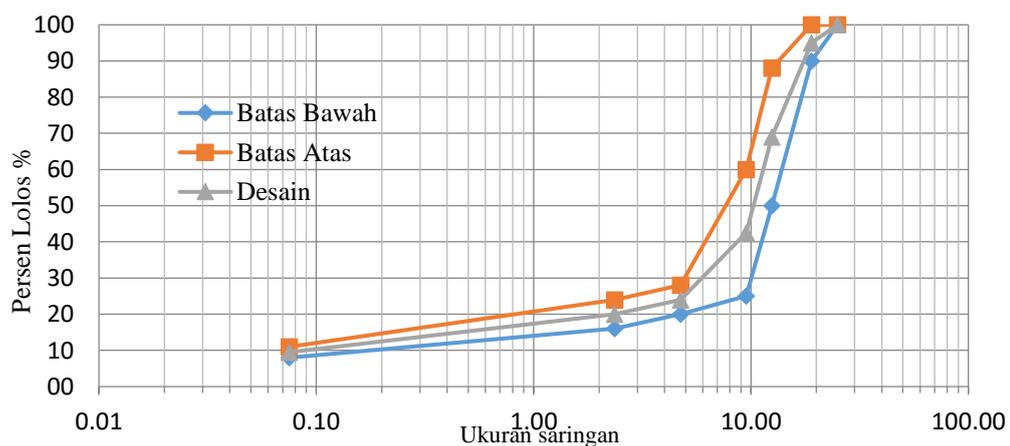
1. Menentukan variasi kadar aspal pada campuran dengan perhitungan Pb.
2. Melakukan pembuatan benda uji yang dipadatkan dengan alat pemada *Marshall* dengan 2x75 tumbukan.
3. Menentukan nilai Kadar Aspal Optimum berdasarkan kriteria parameter berikut ini.
  - a. *VIM* campuran SMA dan campuran SMA Mod dengan syarat minimum 4% dan syarat maksimum 5%.
  - b. *VMA* campuran SMA dan campuran SMA Mod dengan syarat minimum 17%.
  - c. Kadar aspal campuran SMA dan campuran SMA Mod dengan syarat minimum 6% dan syarat maksimum 7%.
  - d. Stabilitas *marshall* campuran SMA dengan syarat minimum 600kg dan campuran SMA Mod dengan syarat minimum 750kg.
  - e. Pelelehan (*flow*) campuran SMA dan campuran SMA Mod dengan syarat minimum 2 mm dan syarat maksimum 4,5 mm

Perencanaan gradasi agregat campuran *Stone Matrix Asphalt* 12,5 mm dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini.

**Tabel 4.1 Rencana Gradasi Agregat Kasar *Stone Matrix Asphalt***

Ukuran Ayakan		% Berat yang lolos
<i>ASTM</i>	(mm)	<i>SMA</i> (Tebal rancangan min 12,5 mm)
1"	25	
¾"	19	100
½"	12,5	90 - 100
3/8"	9,5	50 - 80
No.4	4,75	20 - 35
No.8	2,36	16 - 24
No.200	0,075	8 - 11

(Sumber : SNI 8129:2015)



**Gambar 4.1 Rencana Gradasi Agregat Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) 12,5 mm**

Setelah perencanaan gradasi agregat, selanjutnya mencari perkiraan kadar aspal optimum (KAO). Perkiraan kadar aspal optimum rencana dapat dicari menggunakan Persamaan 4.1 berikut.

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

dengan:

$P_b$  = Kadar aspal perkiraan,

$CA$  = Agregat kasar tertahan saringan No. 4,

- FA = Agregat halus lolos saringan No. 4 dan tertahan No. 200,  
 FF = Agregat halus lolos saringan No. 200, dan  
 K = Konstanta 0.5 - 1 untuk Lapis Aspal Beton (Laston).

Dari hasil persamaan 4.1 didapat nilai kadar aspal perkiraan sebagai berikut:

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

$$P_b = 0,035 (72,5\%) + 0,045 (18\%) + 0,18 (9,5\%) + 1$$

$$P_b = 6,0575\% \text{ dibulatkan menjadi } 6,5\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan perkiraan awal ( $P_b$ ), didapatkan nilai  $P_b$  adalah 6,5%. Syarat kadar aspal pada spesifikasi SNI 8129 : 2015 untuk campuran SMA 12,5 mm adalah minimum 6%. Pada pengujian untuk mencari kadar aspal optimum (KAO), kadar aspal yang digunakan adalah 5,5%, 6%, 6,5%, 7,5% dan 7,5% terhadap berat total campuran. Kadar serat selulosa yaitu dedak padi pada masing- masing benda uji menurut SNI 8129 : 2015 adalah sebesar 0,3% terhadap berat total campuran, yaitu sebanyak 3,6 gram. Berat total campuran untuk setiap benda uji adalah 1200 gram dengan menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

Kebutuhan agregat pada tiap-tiap kadar aspal dapat dilihat pada Tabel 4.2, Tabel 4.3, Tabel 4.4, Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 berikut ini.

**Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5,5 %**

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gram)	
inci	Mm	Min.	Maks.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
¾"	19	100	100	100			
½"	12,5	90	100	95	5	56,7	65,7
3/8"	9,5	50	80	65	35	340,2	396,9
No. 4	4,75	20	35	27,5	72,5	425,25	822,15
No. 8	2,36	16	24	20	80	85,05	907,2
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5	119,07	1026,27
Pan		0	0	0	100	107,73	1134
Jumlah						1134	

**Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6 %**

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gram)	
inci	mm	Min.	Maks.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
¾"	19	100	100	100			
½"	12,5	90	100	95	5	56,4	56,4
3/8"	9,5	50	80	65	35	338,4	394,8
No. 4	4,75	20	35	27,5	72,5	423	817,8
No. 8	2,36	16	24	20	80	84,6	902,4
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5	118,44	1020,84
Pan		0	0	0	100	107,16	1128
Jumlah						1128	

**Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6,5 %**

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gram)	
inci	mm	Min.	Maks.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
¾"	19	100	100	100			
½"	12,5	90	100	95	5	56,1	56,1
3/8"	9,5	50	80	65	35	336,6	392,7
No. 4	4,75	20	35	27,5	72,5	420,75	813,45
No. 8	2,36	16	24	20	80	84,15	897,6
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5	117,81	1015,41
Pan		0	0	0	100	106,59	1122
Jumlah						1122	

**Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7 %**

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gram)	
inci	Mm	Min.	Maks.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
¾"	19	100	100	100			
½"	12,5	90	100	95	5	55,8	55,8
3/8"	9,5	50	80	65	35	334,8	390,6
No. 4	4,75	20	35	27,5	72,5	418,5	809,1
No. 8	2,36	16	24	20	80	83,7	892,8
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5	117,18	1009,98
Pan		0	0	0	100	106,02	1116
Jumlah						1116	

**Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7,5 %**

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gram)	
inci	Mm	Min.	Maks.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
¾"	19	100	100	100			
½"	12,5	90	100	95	5	55,5	55,5
3/8"	9,5	50	80	65	35	333	388,5
No. 4	4,75	20	35	27,5	72,5	416,25	804,75
No. 8	2,36	16	24	20	80	83,25	888
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5	116,55	1004,55
Pan		0	0	0	100	105,45	1110
Jumlah						1110	

Jumlah benda uji yang digunakan dalam mencari Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini.

**Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji Untuk memperoleh Nilai KAO**

Jenis Aspal	Kadar Aspal %					Jumlah Benda Uji
	5,5	6	6,5	7	7,5	
Pen 60/70	3	3	3	3	3	15 Buah
<i>Crumb Rubber</i>	3	3	3	3	3	15 Buah
Total Benda Uji						30 Buah

Berdasarkan nilai kadar aspal optimum (KAO) yang telah didapat yaitu 6,985% pada campuran berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan 6,850% pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber*, maka kebutuhan jumlah agregat yang digunakan pada campuran masing-masing jenis aspal dapat dilihat pada Tabel 4.8 hingga 4.9 berikut ini.

**Tabel 4.8 Jumlah Kebutuhan Agregat Campuran Aspal Pen 60/70 dengan Kadar Aspal 6,985 %**

No. Saringan		Spesifikasi		Kumulatif		Berat Tertahan (gr)	
Inch	mm	Max	Min	Lolos	Tertahan	Jumlah	Tertahan
1"	25	100	100	100	0	0	0
3/4"	19	100	100	100	0	0	0
1/2"	12,5	100	90	95	5	55,81	55,81
3/8"	9,5	80	50	65	35	390,66	334,85
No. 4	4,75	35	20	27,5	72,5	809,23	418,57
No. 8	2,36	24	16	20	80	892,94	83,71
No. 200	0,08	11	8	9,5	90,5	1010,14	117,20
Pan		0	0	0	100	1116,18	106,04
Jumlah							1116,2

**Tabel 4.9 Jumlah Kebutuhan Agregat Campuran Aspal Crumb Rubber dengan Kadar Aspal 6,850 %**

No. Saringan		Spesifikasi		Kumulatif		Berat Tertahan (gr)	
Inch	mm	Max	Min	Lolos	Tertahan	Jumlah	Tertahan
1"	25	100	100	100	0	0	0
3/4"	19	100	100	100	0	0	0
1/2"	12,5	100	90	95	5	55,89	55,89
3/8"	9,5	80	50	65	35	391,23	335,34
No. 4	4,75	35	20	27,5	72,5	810,41	419,18
No. 8	2,36	24	16	20	80	894,24	83,84
No. 200	0,08	11	8	9,5	90,5	1011,61	117,37
Pan		0	0	0	100	1117,80	106,19
Jumlah							1117,8

Jumlah benda uji untuk tiap pengujian setelah didapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut ini.

**Tabel 4.10 Jumlah Benda Uji Untuk Tiap Pengujian Pada KAO**

Pengujian	Metode Pencampuran			
	Konvensional		Dua Tahap	
	Pen 60/70	<i>Crumb Rubber</i>	Pen 60/70	<i>Crumb Rubber</i>
<i>Marshall Quotient</i>	3	3	3	3
<i>IRS</i>	3	3	3	3
<i>ITS</i>	3	3	3	3
<i>TSR</i>	3	3	3	3
<i>Cantabro Test</i>	3	3	3	3
Jumlah	30		30	
Total Benda Uji	60 Buah			

Setelah mendapatkan kadar aspal optimum selanjutnya dilakukan pengujian *Marshall Test*, *Immersion Test (IRS)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)*, *Tensile Strength Ratio (TSR)*, dan *Cantabro Test*. Total benda uji dalam penelitian ini adalah sebanyak 90 buah benda uji, sedangkan jumlah berat campuran untuk masing-masing benda uji sebesar 1200 gram. Pembuatan benda uji dilakukan dengan mengacu pada SNI 8129:2015.

#### 4.4.4 Pembuatan Campuran Sampel

Setelah mendapatkan nilai berat tertahan pada masing-masing kadar aspal, dilakukan penyaringan agregat. Penyaringan agregat ini bertujuan untuk memisahkan ukuran butiran sesuai nomor saringan agregat. Kemudian menimbang ukuran butiran agregat sesuai nilai berat tertahan pada masing-masing kadar aspal. Setelah proses penyaringan dan penimbangan, agregat kasar, halus, dan *filler* di bungkus dengan plastik.

Penelitian ini menggunakan dua metode pencampuran pada saat proses pencampuran agregat dengan aspal yaitu, metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap, dimana metode pencampuran dua tahap dilakukan setelah mendapat nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Metode pencampuran dua

tahap ini bertujuan membentuk ikatan yang sangat kuat antara aspal dengan agregat kasar dan pengikatan yang optimal bisa mengatasi masalah debu dan kelembaban pada agregat kasar.

Selanjutnya pembuatan sampel campuran. Cara pembuatan sampel dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut ini:

1. Memanaskan aspal. Untuk aspal Pen 60/70 dipanaskan hingga mencapai suhu 160°C dan untuk aspal *Crumb Rubber* dipanaskan hingga mencapai suhu 198°C.
2. Pada tahap pencampuran aspal panas dengan agregat panas terdapat perbedaan antara sebelum mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dan setelah mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Perbedaan kedua proses pencampuran tersebut antara lain:
  - a. Penentuan nilai KAO.

Proses pembuatan sampel yang digunakan sebelum mendapatkan nilai KAO dibuat dengan metode pencampuran konvensional yaitu dengan mencampurkan agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan serat selulosa yang telah dipanaskan mencapai suhu 170°C dalam satu wajan dengan bahan ikat aspal panas sesuai dengan nilai kadar aspal optimum (KAO), kemudian mengaduk campuran secara merata.

- b. Campuran pada KAO.

Setelah KAO diperoleh, dibuat spesimen dengan 2 metode pencampuran, yaitu:

- 1) Untuk membandingkan sampel yang digunakan pada dua metode pencampuran, campuran utama dibuat dengan metode pencampuran secara konvensional sama seperti proses pembuatan sampel penentuan nilai KAO. Peninjauan sampel disusun menjadi dua kelompok. Kelompok pertama menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan kelompok kedua menggunakan bahan ikat aspal *Crumb Rubber*.
- 2) Campuran kedua dibuat dengan metode pencampuran dua tahap. Metode pencampuran dua tahap didasarkan pada pelapisan awal agregat kasar dengan jumlah aspal sesuai dengan kadar aspal optimal sebelum

pencampuran agregat halus dan *filler*. Berikut tahapan yang digunakan untuk metode pencampuran dua tahap:

- a) Memanaskan agregat kasar yang sebelumnya telah dipisahkan dengan agregat halus dan *filler* dengan wajan yang berbeda hingga masing-masing agregat kasar, agregat halus dan *filler* mencapai suhu 170°C.
- b) Mencampurkan agregat kasar terlebih dahulu dengan aspal sesuai dengan nilai kadar aspal optimum (KAO) dan mengaduk secara merata hingga aspal menutupi seluruh permukaan agregat kasar .
- c) Agregat kasar yang telah terlapisi oleh aspal kemudian dicampurkan dengan agregat halus, *filler*, dan serat selulosa yang sebelumnya telah dipanaskan pada wajan yang berbeda. Kemudian mengaduk campuran secara merata.

Peninjauan sampel yang dibuat menggunakan metode pencampuran dua tahap disusun menjadi dua kelompok. Kelompok pertama menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan kelompok kedua menggunakan bahan ikat aspal *Crumb Rubber*.

3. Membersihkan cetakan benda uji *mold* dan mengolesi bagian dalamnya dengan minyak pelumas.
4. Meletakkan selembat kertas / kertas penghisap yang sudah digunting sesuai dengan ukuran cetakan dibagian bawah cetakan, kemudian memasukkan benda uji 1/3 dari volume cetakan dan dipukul menggunakan spatula sebanyak 25x (15x pukulan di pinggir, dan 10x pukulan di tengah), kemudian memasukkan benda uji hingga 2/3 dari volume cetakan dan dipukul menggunakan spatula sebanyak 25x, dengan cara tersebut memasukkan benda uji kembali hingga penuh dalam volume cetakan dan dipukul menggunakan spatula sebanyak 25x dan menaruh kertas penghisap di permukaan.
5. Meletakkan cetakan *mold* diatas dudukannya (landasan) pemadatan. Memadatkan sebanyak 75x pukulan di sisi pertama dan menumbuk 75x pukulan di sisi kedua.
6. Mendinginkan benda uji sesudah pemadatan selesai sampai mencapai suhu ruang, kemudian mengeluarkan benda uji dari cetakan dengan menggunakan *ejector*

*hydraulic pump* lalu mendinginkan sampel sampai mencapai suhu ruang. Setelah dingin ambil kertas penghisap di kedua sisi untuk memberikan kodefikasi terhadap sampel tersebut.

#### **4.4.5 Pengujian *Marshall Test***

*Marshall Test* bertujuan untuk memperoleh nilai-nilai dari stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *VITM* (*void in total mix*), *VFWA* (*void filled with asphalt*), *VMA* (*void in mineral aggregate*), kepadatan (*density*), *MQ* (*Marshall quotient*). Cara pengujian *Marshall Test* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

1. Menyiapkan semua peralatan dan benda uji, kemudian membersihkan benda uji dari kotoran yang menempel selama proses pencetakan.
2. Mengukur tinggi benda uji dengan *Caliper* sebanyak tiga kali di tiga posisi berbeda, sampai mendapatkan angka yang mendekati angka rata-rata, kemudian menimbang dan mencatat beratnya sehingga mendapatkan benda uji sebelum direndam.
3. Merendam benda uji didalam air selama 20 s/d 24 jam pada suhu ruang untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang didalam air untuk mendapatkan berat isi.
4. Mengeluarkan benda uji dari rendaman lalu mengelap bagian permukaannya (hingga mencapai kering permukaan atau *SSD*), kemudian menimbang untuk mendapatkan berat jenuh.
5. Memasukkan benda uji kedalam bak perendam (*waterbath*) selama 30 menit dengan suhu air 60°C.
6. Menyiapkan kepala penekan *test head* dan memberi minyak pelumas. Kemudian memeriksa mesin penekan *marshall test* dan perlengkapannya, menyetel dial stabilitas pada angka nol.
7. Mengambil benda uji yang direndam dalam bak perendam (*waterbath*) dan memindahkan ke *test head*, memasang dial *flow* pada tempatnya, kemudian menghidupkan mesin pembebanan. Mengamati dial stabilitas dan dial *flow*, caranya membaca dial *flow* bila dial stabilitas telah mencapai angka maksimum.

8. Mencatat pembacaan pada *dial* stabilitas dan *dial flow*, caranya : misal, pada *dial* stabilitas diperoleh 5 putaran dan telah berhenti di 50, berarti pembacaan *dial* stabilitas = 550.
9. Mengulangi langkah-langkah seperti diatas untuk benda uji yang lain sebanyak benda uji yang dibuat dalam penelitian.

#### 4.4.6 Pengujian *Immersion Test*

Pengujian *immersion test* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

1. Membuat benda uji dengan nilai KAO yang telah didapat dari pengujian *marshall*.
2. Mengukur tinggi benda uji dengan *caliper* sebanyak tiga kali di tiga posisi yang berbeda, sampai mendapatkan angka yang mendekati rata-rata, lalu menimbang dan mencatat beratnya sehingga diperoleh berat benda uji sebelum direndam.
3. Merendam benda uji didalam air selama 20 s/d 24 jam pada suhu ruang untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang di dalam air untuk mendapatkan berat isi.
4. Mengeluarkan benda uji dari rendaman lalu mengelap bagian permukannya (hingga mencapai kering permukaan atau *SSD*), kemudian menimbang untuk mendapatkan berat jenuh.
5. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* selama 24 jam.
6. Menyiapkan kepala penekan *test head* dan memberi minyak pelumas. Kemudian memeriksa mesin penekan *marshall test* dan perlengkapannya, menyetel *dial* stabilitas pada angka nol.
7. Mengambil benda uji yang direndam dalam *waterbath* dan memindahkan ke *test head*, memasang *dial flow* pada tempatnya, kemudian menghidupkan mesin pembebanan. Mengamati *dial* stabilitas dan *dial flow*, caranya membaca *dial flow* bila *dial* stabilitas telah mencapai angka maksimum.
8. Membaca pembacaan pada *dial* stabilitas dan *dial flow*.
9. Mengulangi langkah-langkah seperti di atas untuk benda uji yang lain sebanyak benda uji yang dibuat dalam penelitian.

#### 4.4.7 Pengujian *Indirect Tensile Strength*

Pengujian *Indirect Tensile Strength* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

1. Membuat benda uji dengan nilai KAO yang telah didapat dari pengujian *marshall*.
2. Meletakkan benda uji pada alat uji *Indirect Tensile Strength* untuk dilakukan pengujian.
3. Mengamati pembacaan dial dan catat hasilnya.
4. Mengulangi langkah-langkah seperti di atas untuk benda uji yang lain sebanyak benda uji yang dibuat dalam penelitian.

#### 4.4.8 Pengujian *Tensile Strength Ratio*

Pengujian *Tensile Strength Ratio* dapat dilakukan dengan cara berikut ini.

1. Membuat benda uji dengan nilai KAO yang telah didapat dari pengujian *marshall*.
2. Untuk benda uji *TSR*, benda uji terlebih dahulu direndam dalam *Waterbath* dengan suhu  $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$  selama 1 hari. Setelah direndam benda uji kemudian didiamkan dalam suhu ruang  $25^\circ\text{C}$  selama 24 jam.
3. Meletakkan benda uji pada alat uji *Indirect Tensile Strength* untuk dilakukan pengujian.
4. Mengamati pembacaan dial dan catat hasilnya.
5. Mengulangi langkah-langkah seperti di atas untuk benda uji yang lain sebanyak benda uji yang dibuat dalam penelitian.

#### 4.4.9 Pengujian *Cantabro Test*

Pengujian *Indirect Tensile Strength* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

1. Membuat benda uji dengan nilai KAO yang telah didapat dari pengujian *marshall*.
2. Menimbang benda uji sebelum dilakukan pengujian.
3. Memasukkan benda uji kedalam mesin *Los Angeles*.

4. Menjalankan mesin *Los Angeles* dan memutar mesin tersebut sebanyak 300 putaran.
5. Menimbang benda uji setelah pengujian.
6. Mengulangi langkah-langkah seperti di atas untuk benda uji yang lain sebanyak benda uji yang dibuat dalam penelitian.

#### 4.5 Analisis Data

Analisis data yang akan dilakukan setelah melakukan pengujian pada benda uji adalah sebagai berikut ini.

##### 1. Analisis karakteristik *Marshall*

Dari pengujian *Marshall* diperoleh data sebagai berikut:

- a. berat benda uji sebelum direndam (gram),
- b. berat benda uji di dalam air (gram),
- c. berat benda uji dalam keadaan jenuh,
- d. tebal benda uji,
- e. pembacaan *dial* stabilitas (Kg), dan
- f. pembacaan *dial* kelelahan (mm).

Nilai-nilai karakteristik *Marshall* dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini.

- a. Berat jenis aspal

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

dengan:

A = Berat piknometer dengan penutup (gram),

B = Berat piknometer berisi air (gram),

C = Berat piknometer berisi aspal (gram), dan

D = Berat piknometer berisi aspal dan air (gram).

- b. Berat jenis agregat

$$BJ \text{ Agregat} = \frac{(A.F1)+(B.F2)}{100} \quad (4.3)$$

dengan:

A = Persentase agregat kasar,

B = Persentase agregat halus,

F1 = Berat jenis agregat kasar, dan

F2 = Berat jenis agregat halus.

- c. Nilai-nilai stabilitas menggunakan Persamaan 3.9.
- d. Kelelahan (*flow*) dibaca dari pembacaan arloji kelelahan.
- e. *Marshall Quotient (MQ)* menggunakan Persamaan 3.10
- e. *Void in Mineral Aggregate (VMA)* menggunakan Persamaan 3.4.
- f. *Void in ix (VIM)* menggunakan Persamaan 3.5.
- g. *Void Filled With Asphalt (VFWA)* menggunakan Persamaan 3.6.

## 2. Analisis Kadar Aspal Optimum (KAO)

Pemilihan kadar aspal optimum (KAO) pada campuran SMA ditentukan pada karakteristik pada hasil pengujian *Marshall* yang memenuhi kriteria parameter berikut ini.

- a. *Void in Mix (VIM)* dengan syarat minimum 4% dan maksimum 5%.
- b. *Void in Mineral Aggregate (VMA)* dengan syarat minimum 17%.
- c. Kadar aspal campuran dengan syarat minimum 6%.
- d. Pelelehan (*flow*) dengan syarat minimum 2mm dan maksimum 4,5mm

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* tersebut telah memenuhi parameter, maka diperoleh batas maksimum dan batas minimum. Nilai kadar aspal optimum didapatkan dari nilai tengah antara batas maksimum dan batas optimum.

## 3. Analisis Uji Perendaman (*Immersion Test*)

Nilai *index of retained strength* diperoleh dari hasil *immersion test* kemudian analisis data menggunakan Persamaan 3.11.

## 4. Analisis Uji *Indirect Tensile Strength (ITS)*

*Indirect Tensile Strength Test* adalah kuat tarik maksimum, yang dihitung dari puncak beban kemudian diolah menggunakan Persamaan 3.12.

## 5. Analisis Uji *Tensile Strength Ratio (TSR)*

Nilai uji *Tensile Strength Ratio* diperoleh dari kuat tarik maksimum untuk benda uji *conditioned* kemudian analisis data menggunakan Persamaan 3.13.

6. Analisis Uji *Cantabro*

Nilai *Cantabro Loss* diperoleh dari uji keausan menggunakan mesin *los angeles* kemudian analisis data menggunakan Persamaan 3.14.

7. Nilai Analisis kepekaan *bitumen* terhadap temperatur / Indeks Penetrasi (*PI*) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.15 dan Persamaan 3.16.

8. Analisis Nilai  $S_{bit}$  dan  $S_{mix}$

Nilai analisis modulus kekakuan aspal ( $S_{bit}$ ), dan modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.17 sampai dengan Persamaan 3.22 dan *Plotting* nomogram Vander Poel.

9. Analisis Statistik *Anova* dan *Independent Sample T-Test*

Pada penelitian ini digunakan 2 metode analisis data, yaitu metode analisis *Anova* dan *T-Test*. Analisis statistik dengan metode *anova* bertujuan untuk mengetahui perubahan yang terjadi akibat dari variasi metode pencampuran terhadap jenis campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm, sedangkan analisis statistik dengan metode *T-Test* bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara 2 jenis aspal yang berbeda yaitu aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* yang digunakan pada perkerasan dengan campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm.

Sehingga hipotesis matematika yang digunakan pada analisis data penelitian ini adalah sebagai berikut.

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

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad (4.5)$$

dengan :

$H_0$  = Tidak ada perbedaan yang signifikan terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* akibat pengaruh metode pencampuran dua tahap.

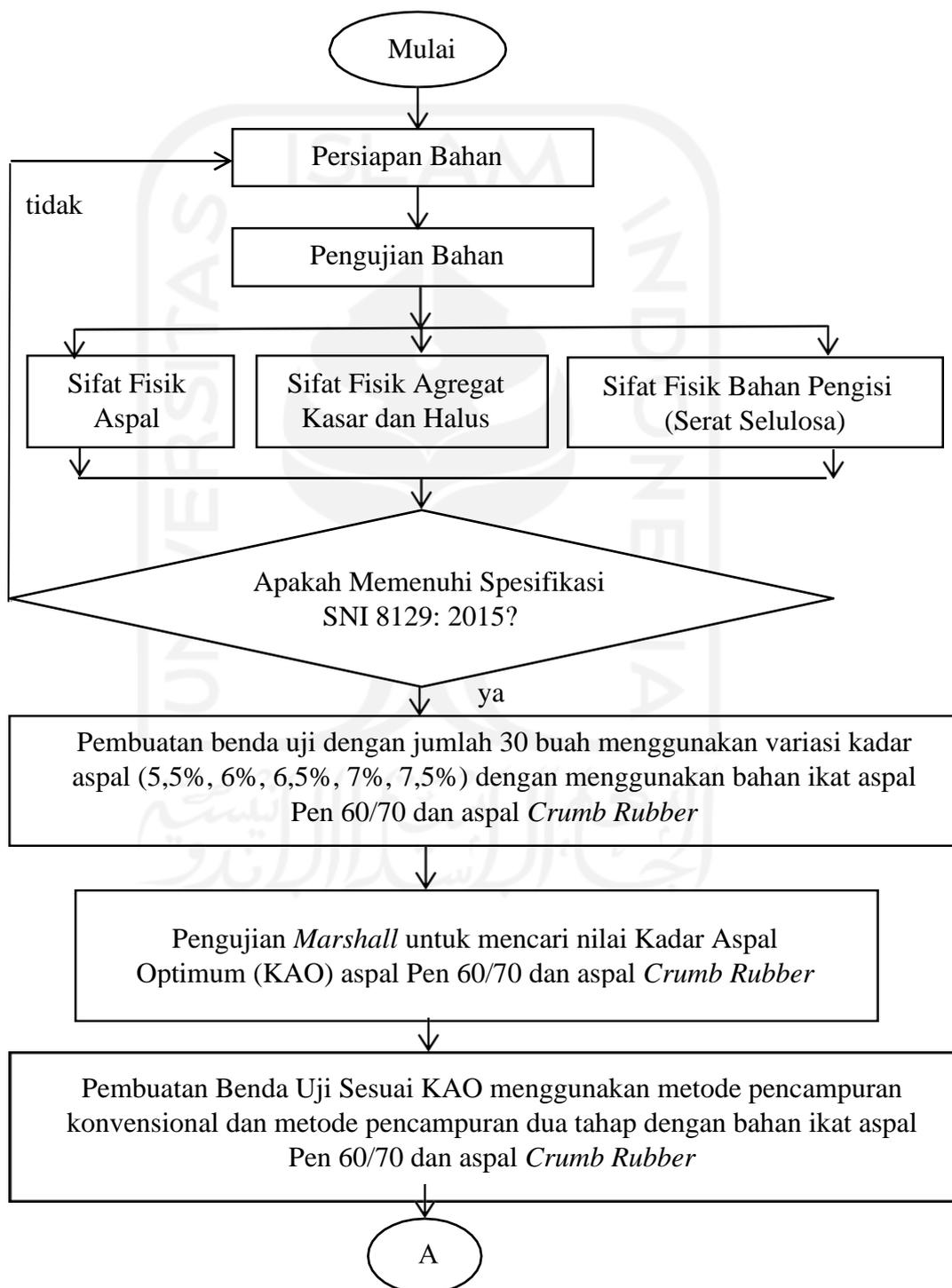
$H_1$  = Ada perbedaan yang signifikan terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* akibat pengaruh metode pencampuran dua tahap.

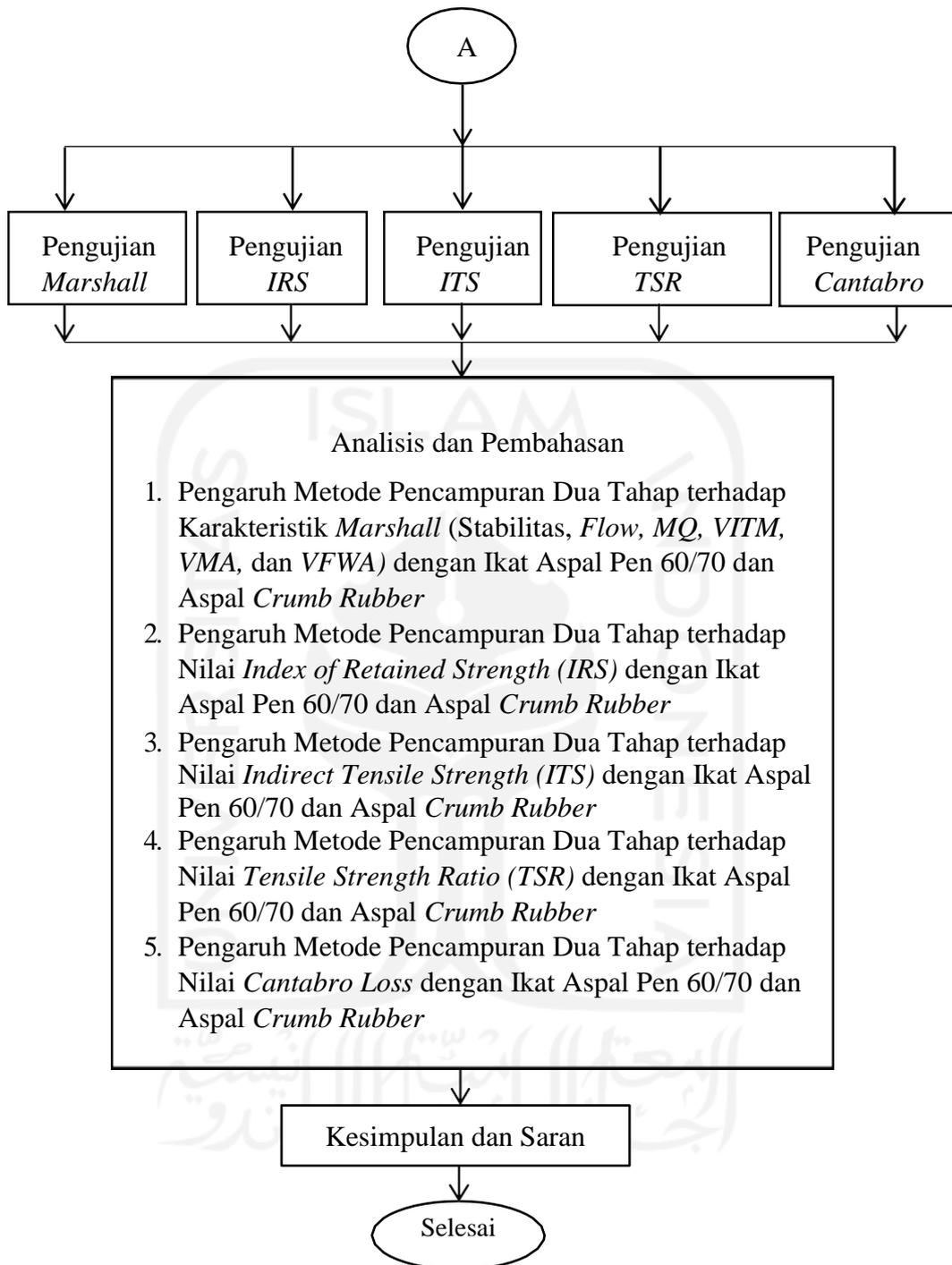
Jika nilai rasio uji yang didapat berada di daerah penerimaan maka  $H_0$  diterima, begitu juga sebaliknya jika nilai rasio uji yang didapat berada didaerah penolakan maka  $H_1$  diterima dan  $H_0$  ditolak.



#### 4.6 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian merupakan bagan yang menunjukkan alir atau tahapan-tahapan suatu penelitian yang dibuat secara singkat dan jelas. Bagan alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini.





**Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian**

## BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Hasil Penelitian

Pengujian campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan dua metode pencampuran dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dilakukan di Laboratorium Jalan Raya FTSP UII, meliputi pengujian sifat fisik material agregat dan aspal kemudian mencari kadar aspal optimum pada masing-masing bahan ikat aspal serta melakukan pengujian pada masing-masing KAO menggunakan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap. Berikut hasil penelitian pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan dua metode pencampuran dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

#### 5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat dan *Filler*

Pengujian terhadap karakteristik agregat mengacu pada persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 dan dilakukan di Laboratorium Jalan Raya FTSP UII, Yogyakarta. Pengujian yang dilakukan diantaranya adalah pengujian agregat kasar, agregat halus dan *filler* debu batu dengan material diperoleh dari Sungai Clereng, Kulonprogo. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.1, Tabel 5.2, dan Tabel 5.3. Tabel hasil pengujian karakteristik agregat selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 13 sampai dengan Lampiran 19.

**Tabel 5.1 Hasil Pengujian Agregat Kasar**

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Keterangan
1.	Berat Jenis	2,664	Min. 2,5	Memenuhi
2.	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	1,692	Maks. 2	Memenuhi
3.	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal (%)	97	Min. 95	Memenuhi
4.	Keausan dengan Mesin <i>Los Angles</i> (%)	14,95	Maks. 30	Memenuhi

**Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Halus**

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Spesifikasi	Keterangan
1.	Berat Jenis	2,605	Min. 2,5	Memenuhi
2.	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	2,357	Maks. 3	Memenuhi
3.	<i>San Equivalent</i> (%)	91,98	Min. 60	Memenuhi

**Tabel 5.3 Hasil Pengujian Filler Abu Batu Clereng**

No.	Jenis Pengujian	Jenis	Hasil
1.	Berat Jenis	Debu Batu	2,553

### 5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal Pen 60/70 dari Pertamina yang sudah tersedia di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia dan aspal *Crumb Rubber* dari PT.Bintang Djaja Pertamina, Cilacap. Data yang diperoleh dari pengujian ini telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015. Hasil pengujian kedua aspal tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5 berikut ini. Tabel hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1 sampai dengan Lampiran 12.

**Tabel 5.4 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70**

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Nilai Persyaratan	Keterangan
1	Berat Jenis	1,023	$\geq 1,0$	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60,15	60 - 70	Memenuhi
3	Daktalitas (cm)	164	$\geq 100$	Memenuhi
4	Titik Nyala (°C)	327	$\geq 232$	Memenuhi
5	Titik Bakar (°C)	335	$\geq 232$	Memenuhi
6	Kelarutan <i>TCE</i> (%)	99,53	$\geq 99$	Memenuhi
7	Titik Lembek (°C)	48	$\geq 48$	Memenuhi

**Tabel 5.5 Hasil Pengujian Aspal *Crumb Rubber***

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Nilai Persyaratan	Keterangan
1	Berat Jenis	1,031	$\geq 1,0$	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	55,6	$\geq 40$	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	109	$\geq 100$	Memenuhi
4	Titik Nyala ( $^{\circ}\text{C}$ )	310	$\geq 232$	Memenuhi
5	Titik Bakar ( $^{\circ}\text{C}$ )	326	$\geq 232$	Memenuhi
6	Kelarutan <i>TCE</i> (%)	99,17	$\geq 99$	Memenuhi
7	Titik Lembek ( $^{\circ}\text{C}$ )	64,3	$\geq 54$	Memenuhi

### 5.1.3 Hasil Pengujian *Marshall Test* Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Pemeriksaan kadar aspal optimum menggunakan pengujian *Marshall* dengan mendapatkan nilai-nilai karakteristik *Marshall* yaitu stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *VMA* (*Void in Mineral Aggregate*), *VFWA* (*Void Filled With Asphalt*), *VITM* (*Void in the Total Mix*), *MQ* (*Marshall Quotient*), dan kepadatan (*density*) dari campuran *SMA* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

Kadar aspal optimum pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm ditentukan sesuai spesifikasi SNI 8129:(2015) berdasarkan kriteria parameter dengan nilai Stabilitas minimum 600kg, nilai *flow* minimum 2 mm maksimum 4,5 mm, *VIM* minimum 4% maksimum 5%, nilai *VMA* minimum 17%, dan kadar aspal campuran minimum 6%. Pada pengujian *Marshall* yang memenuhi seluruh kriteria parameter tersebut akan didapatkan nilai batas maksimum dan batas minimum. Nilai kadar aspal optimum akan diperoleh dari nilai tengah antara batas maksimum dan minimum. Hasil pengujian *Marshall* dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* untuk KAO adalah sebagai berikut.

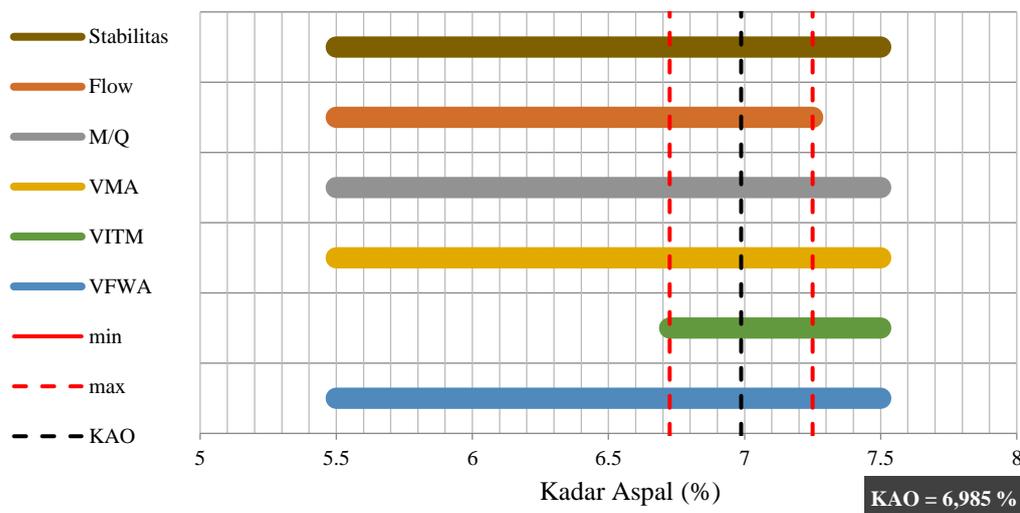
#### 1. Kadar Aspal Optimum untuk bahan ikat aspal Pen 60/70

Hasil pengujian *Marshall* untuk bahan ikat aspal Pen 60/70 dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini.

**Tabel 5.6 Hasil Pengujian *Marshall* Aspal Pen 60/70 untuk Mencari KAO**

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
5,5	815,60	3,07	260,28	6,21	66,92	18,36	2,283
6	842,39	3,23	263,03	5,49	70,93	18,86	2,281
6,5	891,37	3,57	250,39	5,04	74,28	19,50	2,275
7	911,01	4,27	213,82	4,50	77,57	20,05	2,272
7,5	714,79	4,73	151,44	3,90	81,05	20,54	2,270
SNI 8129 : 2015	>600	2 - 4.5		4,0 - 5,0		>17	

Berdasarkan Tabel 5.6 maka diperoleh batas maksimum dan batas minimum untuk menentukan kadar aspal optimum seperti dalam grafik pada Gambar 5.1 di bawah ini. Hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 20.



**Gambar 5.1 Kadar Aspal Optimum Aspal Pen 60/70**

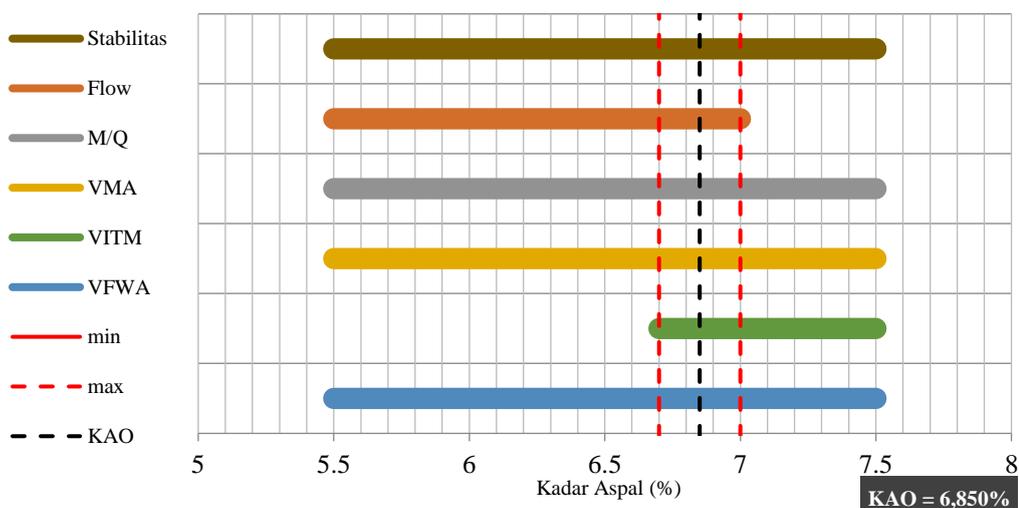
2. Kadar Aspal Optimum untuk bahan ikat aspal *Crumb Rubber*

Hasil pengujian *Marshall* untuk bahan ikat aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Tabel 5.7 berikut ini.

**Tabel 5.7 Hasil Pengujian Marshall Aspal Crumb Rubber untuk Mencari KAO**

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	M <sub>Q</sub> (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
5,5	933,75	3,63	307,52	7,01	63,28	19,08	2,263
6	952,92	4,07	297,00	6,32	67,56	19,50	2,263
6,5	1041,76	4,13	292,60	5,20	73,41	19,54	2,274
7	984,93	4,45	226,04	4,74	76,50	20,14	2,269
7,5	830,15	5,33	162,56	4,41	78,92	20,86	2,261
SNI 8129 : 2015	>750	2 - 4.5		4,0 - 5,0		>17	

Berdasarkan Tabel 5.7 maka diperoleh batas maksimum dan batas minimum untuk menentukan kadar aspal optimum seperti dalam grafik pada Gambar 5.2 di bawah ini. Hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 21.



**Gambar 5.2 Penentuan KAO Aspal Crumb Rubber**

Rekapitulasi nilai KAO pada masing-masing jenis aspal yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut ini.

**Tabel 5.8 Rekapitulasi Kadar Aspal Optimum**

Jenis Aspal	Kadar Aspal Minimum (%)	Kadar Aspal Maksimum (%)	Kadar Aspal Optimum (%)
Aspal Pen 60/70	6,725	7,25	6,985
Aspal <i>Crumb Rubber</i>	6,60	7,10	6,850

Penentuan KAO yaitu mencari batas maksimum dan minimum setiap kadar aspal rencana yang masuk persyaratan pada parameter Stabilitas, *Flow*, *VITM*, *VMA* dan kadar aspal campuran minimum sehingga didapatkan KAO pada aspal Pen 60/70 sebesar 6,985% dan KAO pada aspal *Crumb Rubber* sebesar 6,850%. Sehingga nilai KAO pada aspal Pen 60/70 lebih tinggi dibandingkan dengan KAO pada aspal *Crumb Rubber*.

#### 5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm pada Kadar Aspal Optimum (KAO)

Hasil pengujian campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm pada KAO dengan menggunakan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap meliputi pengujian *Marshall Test*, *Index of Retained Strength (IRS)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)*, *Tensile Stength Ratio (TSR)*, dan *Cantabro* dapat dilihat pada Tabel 5.9 sampai dengan Tabel 5.15. Untuk hasil selengkapnya dari pengujian tersebut dapat dilihat pada Lampiran 25 sampai dengan Lampiran 37.

**Tabel 5.9 Hasil Pengujian *Marshall Test* Menggunakan Dua Metode Pencampuran dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70**

Metode Pencampuran	Stabilitas (kg)	<i>Flow</i> (mm)	<i>MQ</i> (kg/mm)	<i>VITM</i> (%)	<i>VFWA</i> (%)	<i>VMA</i> (%)	<i>Density</i> (gr/cc)
Konvensional	867,00	3,63	253,79	4,32	78,36	19,86	2,277
Dua Tahap	890,36	3,53	256,20	4,14	79,13	19,71	2,281
SNI 8129 : 2015	>600	2 – 4,5		4,0 - 5,0		>17	>2

**Tabel 5.10 Hasil Pengujian *Marshall Test* Menggunakan Dua Metode Pencampuran dengan Bahan Ikat Aspal *Crumb Rubber***

Metode Pencampuran	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
Konvensional	952,02	4,10	256,58	4,70	76,30	19,81	2,275
Dua Tahap	1002,84	3,87	259,91	4,43	77,44	19,58	2,282
SNI 8129 : 2015	>750	2 – 4,5		4,0 - 5,0		>17	>2

**Tabel 5.11 Hasil Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* Menggunakan Dua Metode Pencampuran**

Metode Pencampuran	<i>Index of Retained Strength (%)</i>	
	Aspal Pen 60/70	Aspal <i>Crumb Rubber</i>
Konvensional	90,73	93,35
Dua Tahap	91,50	95,56

**Tabel 5.12 Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* Menggunakan Dua Metode Pencampuran**

Metode Pencampuran	<i>Indirect Tensile Strength (kg/cm<sup>2</sup>)</i>	
	Aspal Pen 60/70	Aspal <i>Crumb Rubber</i>
Konvensional	12,29	16,16
Dua Tahap	14,88	17,36

**Tabel 5.13 Hasil Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)* Menggunakan Dua Metode Pencampuran**

Metode Pencampuran	<i>Tensile Strength Ratio (%)</i>	
	Aspal Pen 60/70	Aspal <i>Crumb Rubber</i>
Konvensional	80,29	84,34
Dua Tahap	81,03	85,86

**Tabel 5.14 Hasil Pengujian *Cantabro Test* Menggunakan Dua Metode Pencampuran**

Metode Pencampuran	<i>Cantabro Loss (%)</i>	
	Aspal Pen 60/70	Aspal <i>Crumb Rubber</i>
Konvensional	9,61	4,18
Dua Tahap	7,56	3,37

### 5.1.5 Hasil Perhitungan Nilai Indeks Penetrasi (*PI*)

Hasil perhitungan nilai indeks penetrasi (*PI*) pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* adalah sebagai berikut ini.

- 1) Aspal Pen 60/70 memiliki nilai penetrasi 60,15 dan titik lembek 48°C

$$A = \frac{\text{Log } 60,15 - \text{Log } 800}{25 - 48} = 0,04886$$

$$PI = \frac{20(1 - 25 \times 0,04886)}{1 + 50 \times 0,04886} = -1,287$$

2) Aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai penetrasi 55,60 dan titik lembek 64,3°C

$$A = \frac{\text{Log } 55,60 - \text{Log } 800}{25 - 64,3} = 0,02946$$

$$PI = \frac{20(1 - 25 \times 0,02946)}{1 + 50 \times 0,02946} = 2,131$$

Rekapitulasi nilai indeks penetrasi (*PI*) pada masing-masing jenis aspal dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut ini.

**Tabel 5.15 Hasil Perhitungan Nilai *PI***

Kode Bitumen	Jenis Tes	Suhu (°C)	Nilai Penetrasi (mm)	A	PI	Keterangan
Aspal Pen 60/70	Tes Pen	25	60,15	0,04886	-1,287	Kepekaan Tinggi
	Tes S.P	48	800			
Aspal <i>Crumb Rubber</i>	Tes Pen	25	55,6	0,02946	2,131	Kepekaan Rendah
	Tes S.P	64,3	800			

Hasil perhitungan nilai indeks penetrasi (*PI*) aspal Pen 60/70 sebesar -1,287 dan hasil perhitungan nilai indeks penetrasi (*PI*) aspal *Crumb Rubber* sebesar 2,131. Nilai indeks penetrasi kedua aspal tersebut menunjukkan adanya perbedaan, aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai indeks penetrasi yang lebih tinggi dari pada aspal Pen 60/70, sehingga aspal *Crumb Rubber* memiliki kepekaan yang rendah terhadap perubahan temperatur daripada aspal Pen 60/70.

#### 5.1.6 Hasil Perhitungan Nilai Modulus Kekakuan Aspal ( $S_{bit}$ ) dan Nilai Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ )

Hasil perhitungan nilai modulus kekakuan aspal ( $S_{bit}$ ) dan nilai modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm adalah sebagai berikut.

##### 1) Modulus Kekakuan Bitumen ( $S_{bit}$ )

Berikut perhitungan  $S_{bit}$  pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

1. Kecepatan kendaraan 40 km/jam,
  2. Temperatur perkerasan Indonesia 41°C,
  3. Panjang tapak kontak ban dengan perkerasan 20 cm,
  4. PI aspal Pen 60/70 = -1,287,
  5. PI aspal *Crumb Rubber* = 2,131,
  6. Titik lembek aspal Pen 60/70 = 48°C, dan
  7. Titik lembek aspal *Crumb Rubber* = 64,3°C.
- a. Menghitung lama pembebanan (*time of loading*)

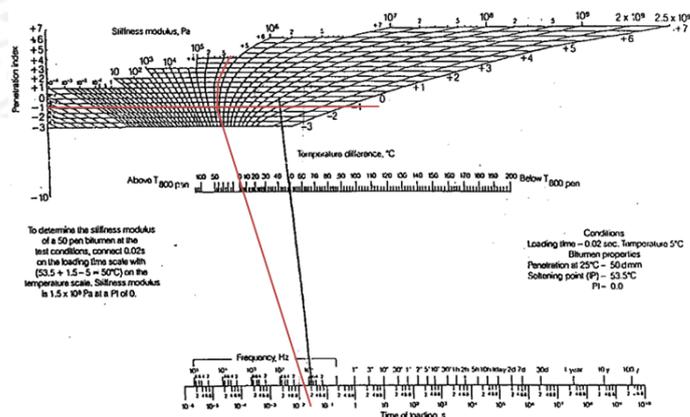
$$\frac{L}{V} = \frac{0,20}{\frac{40 \times 1000}{3600}} = 1,8 \times 10^{-2} \text{ second}$$

- b. Selisih temperatur

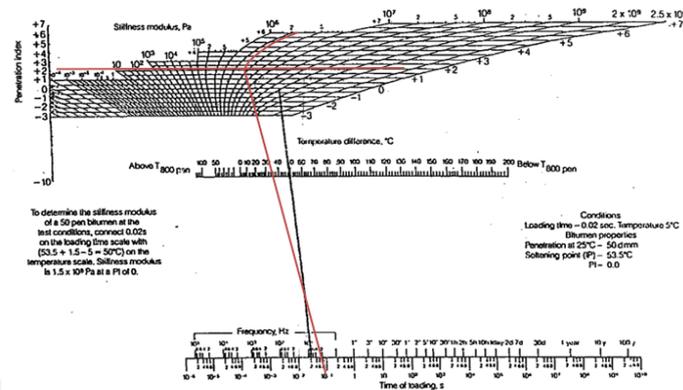
$$\begin{aligned} &\text{Titik lembek aspal Pen 60/70} - \text{Temperatur perkerasan Indonesia} \\ &= 48^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C} \\ &= 7^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Titik lembek aspal } \textit{Crumb Rubber} - \text{Temperatur perkerasan Indonesia} \\ &= 64,3^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C} \\ &= 23,3^\circ\text{C} \end{aligned}$$

*Plotting* nomogram Vander Poel *stiffness* modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4 berikut atau secara detail dapat dilihat pada Lampiran 38 dan Lampiran 39.



**Gambar 5.3 Grafik Nomogram Vander Poel *Stiffness* Modulus Kekakuan *Bitumen* ( $S_{bit}$ ) Aspal Pen 60/70**



**Gambar 5.4 Grafik Nomogram Vander Poel Stiffness Modulus Kekakuan *Bitumen* ( $S_{bit}$ ) Aspal *Crumb Rubber***

Besaran nilai modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) diperoleh melalui nomogram Vander Poel pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4. Garis yang menghubungkan titik lama pembebanan sebesar  $1,8 \times 10^{-2}$  second. Selisih temperatur aspal Pen 60/70 sebesar  $7^{\circ}\text{C}$  dan aspal *Crumb Rubber* sebesar  $23,3^{\circ}\text{C}$  kemudian berpotongan dengan garis  $PI$  aspal Pen 60/70 = -1,287 dan  $PI$  aspal *Crumb Rubber* = 2,131. Selanjutnya diperoleh nilai  $S_{bit}$  pada aspal Pen 60/70 sebesar  $7 \times 10^5$   $\text{N/m}^2$  dan aspal *Crumb Rubber* sebesar  $1,8 \times 10^6$   $\text{N/m}^2$ . Namun untuk nilai  $S_{bit}$  pada nomogram *stiffness* modulus campuran ( $S_{mix}$ ) minimal  $\geq 5 \times 10^6$  sehingga nilai  $S_{bit}$  pada masing-masing bahan ikat ditambahkan +2. Sehingga nilai untuk aspal Pen 60/70 menjadi  $7 \times 10^7$   $\text{N/m}^2$  dan aspal *Crumb Rubber* menjadi  $1,8 \times 10^8$   $\text{N/m}^2$ . Rekapitulasi besaran nilai modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut ini.

**Tabel 5.16 Rekapitulasi Besaran Nilai Modulus Kekakuan *Bitumen* ( $S_{bit}$ ) pada Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Jenis Aspal	Penetration Index	Time of Loading (second)	Selisih Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	$S_{bit}$ (+2) ( $\text{N/m}^2$ )
Aspal Pen 60/70	-1,287	$1,8 \times 10^{-2}$	$7^{\circ}\text{C}$	$7 \times 10^7$
Aspal <i>Crumb Rubber</i>	2,131		$23,3^{\circ}\text{C}$	$1,8 \times 10^8$

Dari hasil rekapitulasi pada Tabel 5.16 besaran nilai modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) pada Tabel 5.16, nilai modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) pada aspal Pen 60/70 sebesar  $7 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> dan nilai modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) pada aspal *Crumb Rubber* sebesar  $1,8 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup>. Nilai modulus kekakuan *bitumen* ( $S_{bit}$ ) dari kedua bahan ikat tersebut menunjukkan adanya perbedaan, aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai  $S_{bit}$  yang lebih tinggi daripada aspal Pen 60/70, sehingga aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai modulus kekakuan yang lebih tinggi dari aspal Pen 60/70.

## 2) Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ )

Berikut perhitungan  $S_{mix}$  pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

Dari hasil pembuatan sampel (silinder *marshall*) diperoleh data:

1. Kadar aspal Pen 60/70 = 6,988%,
2. Kadar aspal *Crumb Rubber* = 6,850%,
3. BJ *Bitumen* aspal Pen 60/70 = 1,023,
4. BJ *Bitumen* aspal *Crumb Rubber* = 1,031,
5. BJ agregat terdiri dari 3 fraksi dengan perbandingan CA, MA, FA = 100%
6. Berat total campuran (sampel) = 1200 gram,
7. *VITM* campuran pada KAO aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Konvensional = 4,32%,
8. *VITM* campuran pada KAO aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap = 4,14%,
9. *VITM* campuran pada KAO aspal Pen *Crumb Rubber* dengan Metode Pencampuran Konvensional = 4,46%, dan
10. *VITM* campuran pada KAO aspal Pen *Crumb Rubber* dengan Metode Pencampuran Dua Tahap = 4,37%.

Kemudian menghitung berat dan volume pada agregat dan aspal. Berikut ini perhitungan mencari berat dan volume pada agregat dan aspal.

a. Menghitung berat dan volume pada aspal

Berat aspal Pen 60/70

$$\frac{6,998}{100} \times 1200 = 83,86 \text{ gram}$$

Volume aspal Pen 60/70

$$\frac{83,86}{1,023} = 81,97 \text{ cc}$$

Berat aspal *Crumb Rubber*

$$\frac{6,850}{100} \times 1200 = 82,22 \text{ gram}$$

Volume aspal *Crumb Rubber*

$$\frac{82,22}{1,031} = 79,75 \text{ cc}$$

b. Menghitung berat dan volume agregat

Berat agregat aspal Pen 60/70

$$\frac{83,86}{100} \times 1200 = 1116,14 \text{ gram}$$

Volume agregat aspal Pen 60/70

$$\frac{1116,14}{2,664} \times 1200 = 418,97 \text{ cc}$$

Berat agregat aspal *Crumb Rubber*

$$\frac{82,22}{100} \times 1200 = 1117,8 \text{ gram}$$

Volume agregat aspal *Crumb Rubber*

$$\frac{1117,8}{2,664} \times 1200 = 419,59 \text{ cc}$$

Kemudian setelah mendapatkan berat dan volume pada agregat dan aspal. Dalam grafik nomogram  $S_{mix}$  didasarkan pada perbandingan volume. Untuk itu, hasil hitungan yang merupakan proporsi berat dikonversi ke dalam proporsi volume. Konversi hitungan persentase volume agregat, aspal dan *voids* dapat dihitung dengan cara berikut ini.

c. Konversi persentase volume agregat, aspal, dan *voids*

#### Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Konvensional

$$\% \text{ Volume voids} = 4,32 \%$$

$$\% \text{ Volume aspal} = \frac{81,97}{81,97+418,97} \times (100 - 4,32) \times 100\% = 15,66 \%$$

$$\% \text{ Volume agregat} = \frac{418,97}{81,97+418,97} \times (100 - 4,32) \times 100\% = 80,02 \%$$

#### Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap

$$\% \text{ Volume voids} = 4,14 \%$$

$$\% \text{ Volume aspal} = \frac{81,97}{81,97+418,97} \times (100 - 4,14) \times 100\% = 15,69 \%$$

$$\% \text{ Volume agregat} = \frac{418,97}{81,97+418,97} \times (100 - 4,14) \times 100\% = 80,17 \%$$

#### d. Konversi persentase volume agregat, aspal, dan voids

##### Aspal *Crumb Rubber* dengan Pencampuran Konvensional

$$\% \text{ Volume voids} = 4,46 \%$$

$$\% \text{ Volume aspal} = \frac{79,75}{79,75+419,59} \times (100 - 4,46) \times 100\% = 15,25 \%$$

$$\% \text{ Volume agregat} = \frac{419,59}{79,75+419,59} \times (100 - 4,46) \times 100\% = 80,28 \%$$

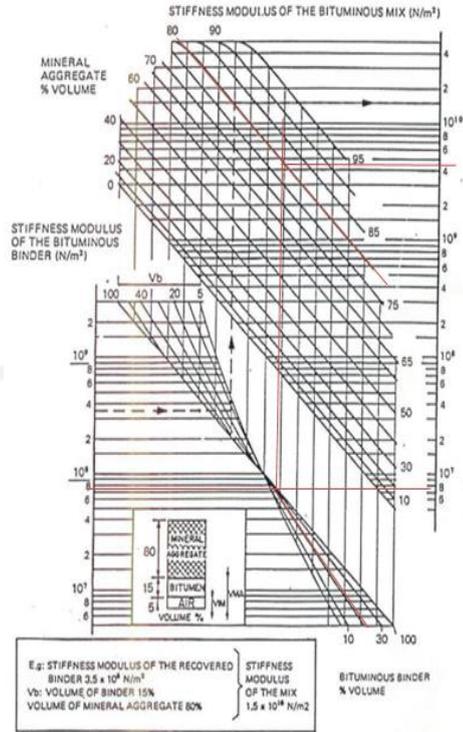
##### Aspal *Crumb Rubber* dengan Metode Pencampuran Dua Tahap

$$\% \text{ Volume voids} = 4,37 \%$$

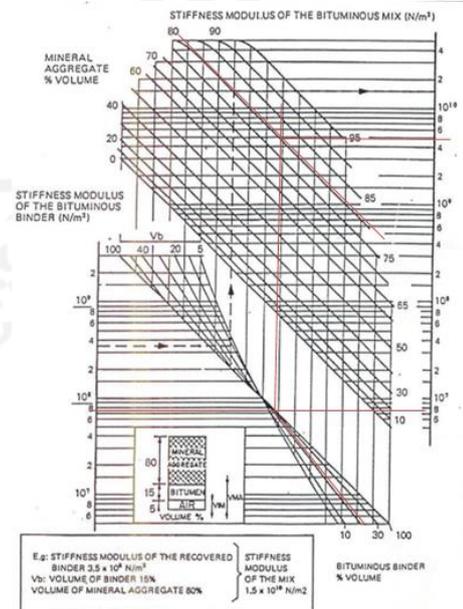
$$\% \text{ Volume aspal} = \frac{79,75}{79,75+419,59} \times (100 - 4,37) \times 100\% = 15,27 \%$$

$$\% \text{ Volume agregat} = \frac{419,59}{79,75+419,59} \times (100 - 4,37) \times 100\% = 80,37 \%$$

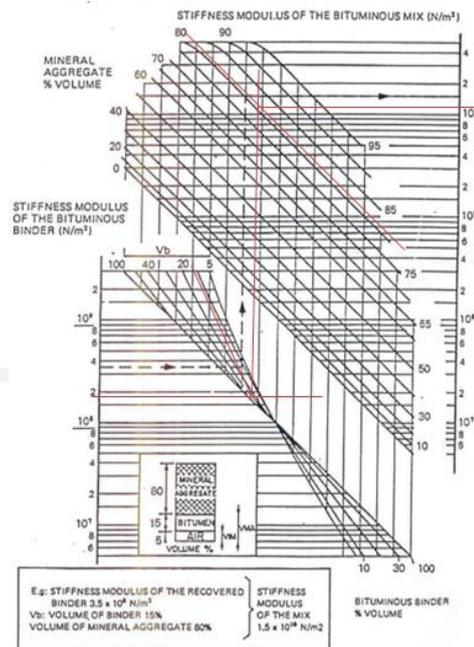
Kemudian melakukan *plotting* pada nomogram *stiffness*. *Plotting* nomogram *stiffness* modulus campuran ( $S_{mix}$ ) pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Gambar 5.5 sampai dengan Gambar 5.8 berikut atau secara detail dapat dilihat pada Lampiran 40 sampai dengan Lampiran 43.



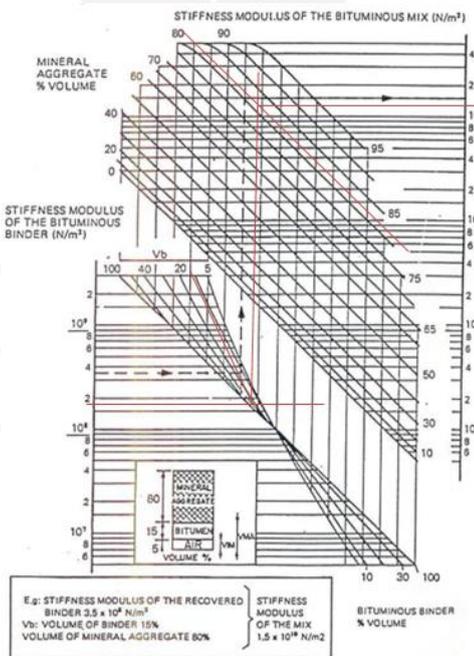
Gambar 5.5 Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Konvensional



Gambar 5.6 Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap



**Gambar 5.7** Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal *Crumb Rubber* dengan Metode Pencampuran Konvensional



**Gambar 5.8** Grafik Nomogram Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal *Crumb Rubber* dengan Metode Pencampuran Dua Tahap

Nilai modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* diperoleh melalui nomogram *stiffness* modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) pada Gambar 5.5 sampai dengan Gambar 5.8. Besarnya nilai  $S_{mix}$  ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu: Nilai  $S_{bit}$ , volume agregat ( $V_a$ ), volume bitumen ( $V_b$ ), dan konsentrasi rongga ( $VITM$ ). Rekapitulasi besaran nilai modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) pada aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* menggunakan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.

**Tabel 5.17 Rekapitulasi Besaran Nilai Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ ) pada Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* Menggunakan Dua Metode Pencampuran**

Jenis Aspal	Penetration Index	$S_{bit}$ (+2) (N/m <sup>2</sup> )	Metode Konvensional			Metode Dua Tahap		
			Volume Bitumen (%)	Volume Agregat (%)	$S_{mix}$ (Pa)	Volume Bitumen (%)	Volume Agregat (%)	$S_{mix}$ (Pa)
Aspal Pen 60/70	-1,287	$7 \times 10^7$	15,66	80,02	$4,5 \times 10^9$	15,69	80,17	$5 \times 10^9$
Aspal <i>Crumb Rubber</i>	2,131	$1,8 \times 10^8$	15,25	80,28	$1,2 \times 10^{10}$	15,27	80,37	$1,4 \times 10^{10}$

Dari hasil rekapitulasi pada Tabel 5.17 di atas, besaran nilai modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) pada aspal Pen 60/70 sebesar  $4,5 \times 10^9$  Pa dan nilai  $S_{mix}$  pada aspal *Crumb Rubber* sebesar  $1,2 \times 10^{10}$  Pa. Hal ini dapat disimpulkan bahwa campuran dengan menggunakan aspal *Crumb Rubber* memiliki daya dukung yang lebih tinggi daripada campuran menggunakan aspal Pen 60/70. Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada kedua jenis aspal tersebut menghasilkan nilai  $S_{mix}$  yang lebih tinggi daripada menggunakan metode pencampuran konvensional, sehingga penggunaan metode pencampuran bertahap dapat menambah kapasitas dukung perkerasan dalam menahan beban roda kendaraan.

### 5.1.7 Hasil Analisis Statik *T-Test*

Hasil analisis statik *T-Test* meliputi data-data uji sifat fisik aspal, serta data-data karakteristik *Marshall*, *Index of Retained Strength*, *Indirect Tensile Strength*, dan *Cantabro* dengan campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* terhadap campuran berbahan ikat aspal Pen 60/70 yang digunakan pada campuran *Stone Matrix Asphalt* 12,5 mm. Data hasil rekapitulasi analisis statik menggunakan *t-test* dapat dilihat pada Tabel 5.18 sampai dengan Tabel 5.20 berikut atau secara detail dapat dilihat pada Lampiran 47 sampai dengan Lampiran 48..

**Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik *T-Test* untuk Sifat Fisik Aspal *Crumb Rubber* Terhadap Aspal Pen 60/70**

Parameter	Keterangan	Hasil
Beret Jenis	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
Penetrasi	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Daktalitas	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Titik Lembek	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Titik Nyala	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Titik Bakar	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Kelarutan dalam <i>TCE</i>	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
Modulus Kekakuan Aspal ( <i>S<sub>bit</sub></i> )	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan

**Tabel 5.19 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik *T-Test* untuk Pengaruh Aspal Terhadap Karakteristik *Marshall***

Parameter	Keterangan	Hasil
<i>VITM</i>	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
<i>VFWA</i>	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
<i>VMA</i>	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
<i>Density</i>	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
Stabilitas	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
<i>Flow</i>	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
<i>Marshall Quetient</i>	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan

**Tabel 5.20 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik *T-Test* untuk *Index of Retained Strength, Indirect Tensile Strength, Cantabro*, dan  $S_{mix}$**

Parameter	Keterangan	Hasil
IRS	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
ITS	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
TSR	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
<i>Cantabro Loss</i>	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Modulus Kekakuan Campuran ( $S_{mix}$ )	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan

### 5.1.8 Hasil Analisis Statik *Anova*

Hasil analisis statistik *anova* meliputi data-data uji karakteristik *Marshall*, *Index of Retained Strength (IRS)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)*, *Tensile Strength Ratio (TSR)*, dan *Cantabro* dengan adanya metode pencampuran dua tahap terhadap metode pencampuran konvensional pada karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt* 12,5 mm. Data hasil rekapitulasi analisis statik menggunakan *anova* dapat dilihat pada Tabel 5.21 dan Tabel 5.22 berikut ini atau secara detail dapat dilihat pada Lampiran 49 sampai dengan Lampiran 53.

**Tabel 5.21 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik *Anova* Untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Marshall***

Parameter	Keterangan	Hasil
VITM	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
VFWA	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
VMA	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
Density	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
Stabilitas	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan
Flow	H <sub>0</sub> Diterima	Tidak Signifikan
<i>Marshall Quetient</i>	H <sub>0</sub> Ditolak	Signifikan

**Tabel 5.22 Rekapitulasi Hasil Uji Statistik *Anova* Untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap *Index of Retained Strength, Indirect Tensile Strength, Tensile Strength Ratio, dan Cantabro***

Parameter	Keterangan	Hasil
<i>IRS</i>	H0 Ditolak	Signifikan
<i>ITS</i>	H0 Ditolak	Signifikan
<i>TSR</i>	H0 Ditolak	Signifikan
<i>Cantabro</i>	H0 Ditolak	Signifikan

## 5.2 Pembahasan

### 5.2.1 Karakteristik Agregat Kasar

Pembahasan untuk pengujian karakteristik agregat kasar yang digunakan adalah sebagai berikut ini.

#### 1. Berat jenis agregat

Berat jenis agregat adalah perbandingan antara berat dari satuan volume dari suatu material terhadap air pada suhu tertentu. Data berat jenis yang diperiksa adalah berupa berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ), berat benda dalam air (BA), dan berat benda uji dikering oven (BK). Dan pada hasil pengujian berat jenis agregat kasar pada penelitian ini didapatkan sebesar 2,664, yang artinya telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu sebesar  $> 2,5$ .

#### 2. Penyerapan agregat terhadap air

Penyerapan air oleh agregat adalah tingkat kemampuan suatu bahan dalam menyerap air, rongga atau pori agregat. Pada penelitian yang dilakukan didapatkan hasil penyerapan agregat terhadap air sebesar 1,629%. Dari hasil yang didapatkan, diketahui bahwa penyerapan air oleh agregat telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu sebesar  $< 2\%$ .

#### 3. Kelekatan agregat terhadap aspal

Kelekatan agregat terhadap aspal adalah persentase luas permukaan batuan yang tertutup aspal terhadap luas keseluruhan permukaan. Pada pengujian ini didapatkan hasil sebesar 97%, dan artinya kelekatan agregat terhadap aspal pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu  $> 95\%$ .

#### 4. Abrasi dengan mesin *Los Angeles*

Pengujian kehausan untuk mengetahui ketahanan agregat terhadap abrasi dengan menggunakan mesin *Loss Angeles*, dinyatakan dengan perbandingan antara berat bahan yang aus lolos saringan No. 12 terhadap berat mula-mula. Hasil yang di dapatkan pada penelitian ini adalah sebesar 14,95% dan telah memenuhi spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu  $< 30\%$ .

#### 5.2.2 Karakteristik Agregat Halus

Pembahasan untuk pengujian karakteristik agregat halus yang di gunakan adalah sebagai berikut ini.

##### 1. Berat jenis agregat

Berat jenis agregat adalah perbandingan antara berat dari satuan volume dari suatu material terhadap air pada suhu tertentu. Data berat jenis yang diperiksa adalah berupa berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ), berat benda dalam air (BA), dan berat benda uji dikering oven (BK). Dan pada hasil pengujian berat jenis agregat kasar pada penelitian ini didapatkan sebesar 2,605, yang artinya telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu sebesar  $> 2,5$ .

##### 2. Penyerapan agregat terhadap air

Penyerapan air oleh agregat adalah tingkat kemampuan suatu bahan dalam menyerap air, rongga atau pori agregat. Pada penelitian yang dilakukan didapatkan hasil penyerapan agregat terhadap air sebesar 2,357%. Dari hasil yang didapatkan, diketahui bahwa penyerapan air oleh agregat telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu sebesar  $< 3\%$ .

##### 3. *Sand equivalent*

*Sand equivalent* adalah pengujian untuk mengetahui nilai kadar debu dan lumpur pada agregat halus. Hasil pengujian *sand equivalent* pada agregat halus yang digunakan pada penelitian ini didapatkan sebesar 91,980%. Dan dapat diketahui bahwa agregat halus yang digunakan sangat bersih dan terbebas dari kotoran, lumpur atau kotoran. Nilai *sand equivalent* memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu  $> 60\%$ .

#### 4. *Filler*

*Filler* merupakan agregat halus yang telah lolos saringan No. 200. Pada penelitian ini didapatkan hasil nilai berat jenis *filler* debu batu sebesar 2,553%.

### 5.2.3 Karakteristik Aspal

Pembahasan untuk pengujian karakteristik aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* yang digunakan sebagai bahan ikat pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan variasi metode pencampuran adalah sebagai berikut.

#### 1. Berat jenis

Nilai berat jenis aspal sangat berpengaruh terhadap pertimbangan dalam merancang campuran agregat dan aspal, terutama dalam hal penentuan kadar aspal. Berat jenis aspal didapat dari hasil perbandingan antara volume aspal dan volume air. Hasil pengujian berat jenis aspal pada penelitian ini menunjukkan nilai berat jenis aspal Pen 60/70 sebesar 1,023 dan nilai berat jenis *Crumb Rubber* sebesar 1,031. Nilai berat jenis kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang tidak signifikan. Namun berat jenis pada kedua aspal telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 sebesar 1.

#### 2. Penetrasi aspal

Nilai penetrasi aspal menunjukkan tingkat kekerasan pada aspal. Semakin rendah nilai penetrasinya maka semakin keras aspal tersebut, dan begitu juga sebaliknya. Hasil pengujian penetrasi aspal pada penelitian ini menunjukkan nilai penetrasi aspal Pen 60/70 sebesar 60,15 mm dan nilai penetrasi aspal *Crumb Rubber* sebesar 55,6 mm. Nilai penetrasi kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang signifikan, hal ini disebabkan oleh meningkatnya elastisitas aspal *Crumb Rubber* karena adanya kandungan serpihan karet yang juga terdistribusi dalam aspal tersebut. Nilai penetrasi pada kedua aspal telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu antara 60 mm sampai dengan 70 mm pada aspal Pen 60/70 dan antara 40 mm sampai dengan 70 mm pada aspal *Crumb Rubber*.

#### 3. Daktilitas aspal

Nilai daktilitas aspal menunjukkan tingkat kekenyalan pada aspal. Nilai daktilitas ini nantinya akan mempengaruhi nilai fleksibilitas campuran, fleksibilitas

campuran ini merupakan kemampuan suatu campuran dalam menahan beban yang akan diterima tanpa mengalami kerusakan. Hasil pengujian daktilitas aspal pada penelitian ini menunjukkan nilai daktilitas aspal Pen 60/70 sebesar 164 cm atau tidak putus pada saat pengujian dan nilai daktilitas aspal *Crumb Rubber* sebesar 109 cm putus pada saat pengujian. Nilai daktilitas kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang signifikan, karena dalam aspal *Crumb Rubber* tersebut antar partikel karet telah saling membentuk ikatan silang melalui mekanisme pravulkanisasi. Nilai daktilitas pada kedua aspal telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu  $\geq 100$  cm.

#### 4. Titik Nyala Aspal

Nilai titik nyala aspal menunjukkan batas temperatur di mana aspal mulai menyala singkat dan memercikan api. Pengujian ini dilakukan karena adanya sifat aspal yang termoplastik atau kekentalan aspal yang dapat berubah-ubah sesuai perubahan suhu. Hasil pengujian titik nyala aspal pada penelitian ini menunjukkan nilai titik nyala aspal Pen 60/70 sebesar  $327^{\circ}\text{C}$  dan aspal *Crumb Rubber* sebesar  $310^{\circ}\text{C}$ . Nilai titik nyala kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang signifikan, karena aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai titik nyala yang lebih rendah dan artinya aspal *Crumb Rubber* memiliki suhu lebih rendah dari aspal Pen 60/70 pada saat terlihat nyala sekurang-kurangnya 5 detik pada suatu titik di atas permukaan aspal. Nilai titik nyala pada kedua aspal telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu sebesar  $\geq 232^{\circ}\text{C}$ .

#### 5. Titik Bakar Aspal

Nilai titik bakar aspal menunjukkan batas temperatur di mana aspal mulai menimbulkan api yang terlihat menyala  $\pm 5$  detik pada permukaan aspal. Pengujian ini dilakukan karena adanya sifat aspal yang termoplastik atau kekentalan aspal yang dapat berubah-ubah sesuai perubahan suhu. Hasil pengujian titik bakar aspal pada penelitian ini menunjukkan nilai titik bakar aspal Pen 60/70 sebesar  $335^{\circ}\text{C}$  dan aspal *Crumb Rubber* sebesar  $326^{\circ}\text{C}$ . Nilai titik nyala kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang signifikan, karena aspal *Crumb Rubber* memiliki titik bakar yang lebih rendah dan artinya aspal *Crumb Rubber* memiliki suhu lebih rendah pada saat aspal terlihat terbakar singkat pada suatu titik di atas permukaan

aspal. Nilai titik nyala pada kedua aspal telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu sebesar  $\geq 232^{\circ}\text{C}$ .

#### 6. Kelarutan dalam *Tetrachloro Ethylene (TCE)*

Nilai kelarutan aspal dalam *TCE (Trychloroethylene)* menunjukkan persentase jumlah aspal yang larut dalam *Trychloroethylene* yang nantinya akan berpengaruh terhadap ikatan aspal dengan batuan. Hasil pengujian kelarutan aspal dalam *TCE* pada penelitian ini menunjukkan nilai kelarutan pada aspal Pen 60/70 sebesar 99,53% dan pada aspal *Crumb Rubber* sebesar 99,17%. Nilai kelarutan dalam *TCE (Trychloroethylene)* pada kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang tidak signifikan, namun telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu  $\geq 99\%$  untuk kedua jenis aspal.

#### 7. Titik lembek

Nilai titik lembek aspal menunjukkan batas temperatur di mana aspal mulai menjadi lunak atau lembek. Hasil pengujian titik lembek aspal pada penelitian ini menunjukkan nilai titik lembek aspal Pen 60/70 sebesar  $48^{\circ}\text{C}$  dan aspal *Crumb Rubber* sebesar  $68,3^{\circ}\text{C}$ . Nilai titik lembek kedua aspal tersebut menunjukkan hasil yang berbeda secara signifikan, karena aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai titik lembek yang lebih tinggi dan artinya temperatur aspal *Crumb Rubber* pada mulai mengalami kelembekan atau mencapai tingkat *viskositas* lebih tinggi dari aspal Pen 60/70. Nilai titik nyala pada kedua aspal telah memenuhi persyaratan spesifikasi SNI 8129:2015 untuk nilai titik lembek yang disyaratkan pada aspal Pen 60/70 sebesar  $\geq 48^{\circ}\text{C}$  dan pada aspal *Crumb Rubber* sebesar  $\geq 54^{\circ}\text{C}$ .

### 5.2.4 Tinjauan Karakteristik Volumetrik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm*

Tinjauan karakteristik volumetrik pada campuran perkerasan harus diperhatikan, karena dari hasil pengujian volumetrik campuran dapat diketahui kelayakan penggunaan suatu perkerasan. Hasil pengujian volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm* dengan Bahan Ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada pengujian saat ini dapat dilihat pada Tabel 5.23 berikut ini.

**Tabel 5.23 Data Hasil Pengujian Volumentrik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm**

Jenis Bahan Ikat	KAO (%)	VMA (%)	VITM (%)	VFWA (%)	Density (gr/cc)
Aspal Pen 60/70	6,985	19,68	4,59	75,47	2,263
Aspal <i>Crumb Rubber</i>	6,85	20,05	4,21	76,84	2,271
Spesifikasi		> 17	4 - 5	-	-

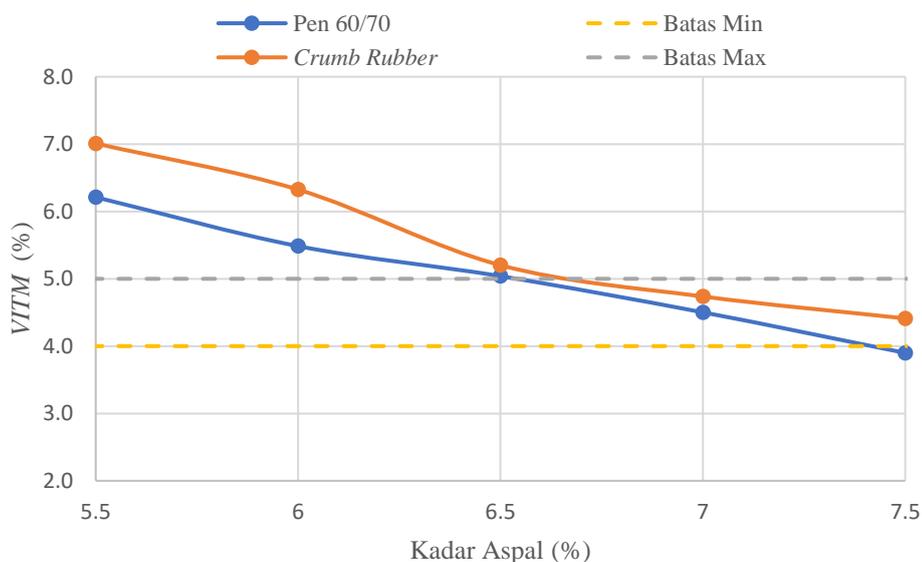
Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai VFWA yang lebih kecil dibandingkan Pen 60/70. Hal ini dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai penetrasi yang rendah dan nilai titik lembek yang tinggi. Namun dapat dilihat pula bahwa campuran *SMA* 12,5 mm yang menggunakan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* sudah memenuhi spesifikasi sehingga dapat dijadikan bahan campuran perkerasan. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Wiranata, A (2018) bahwa aspal *Crumb Rubber* dapat digunakan sebagai bahan ikat, dilihat dari keterpenuhan persyaratan kinerja *Marshall* berdasarkan spesifikasi SNI 8129:2015.

### **5.2.5 Tinjauan Karakteristik *Marshall* Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO)**

Kadar aspal optimum (KAO) aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm ditentukan dengan melihat kriteria parameter pada karakteristik *Marshall*, yaitu berdasarkan nilai VMA (*Void in Mineral Agregate*), VFWA (*Void Filled with Asphalt*), VITM (*Void in The Total Mix*), Kepadatan (*density*), stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), dan MQ (*Marshall Quotient*). Pembahasan dari hasil pengujian karakteristik *Marshall* untuk menentukan KAO pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm adalah sebagai berikut dan rincinya dapat dilihat pada Lampiran 25 dan Lampiran 26.

### 1. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap *VITM* (*Void in the Total Mix*)

Nilai *VITM* adalah persentase banyaknya rongga dalam campuran terhadap volume total campuran yang telah dipadatkan. Campuran beton aspal yang memiliki nilai *VITM*  $< 4\%$  akan dapat menimbulkan terjadinya *bleeding* akibat tingginya temperatur, aspal dalam campuran akan mencair ketika perkerasan menerima beban, menyebabkan aspal akan mengalir di antara rongga agregat. Semakin kecil rongga udara maka campuran beraspal akan semakin kedap terhadap air. Sebaliknya, Jika nilai *VITM*  $> 5\%$  menunjukkan rongga yang terdapat di dalam campuran besar, sehingga campuran tidak rapat dan tidak kedap terhadap udara dan air mengakibatkan oksidasi antara agregat dan aspal dan terjadi pelepasan butiran agregat pada aspal. Berikut ini adalah grafik hasil perbandingan nilai *VITM* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.



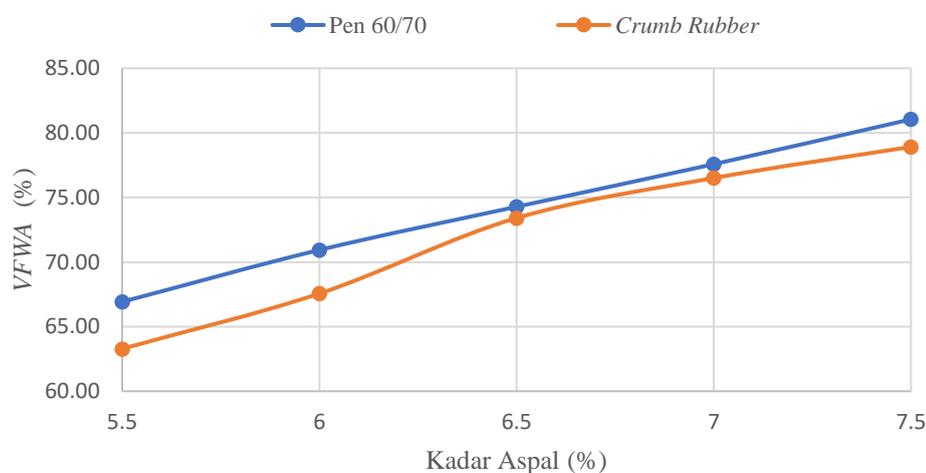
**Gambar 5.9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM***

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.9 dapat dilihat pada campuran dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 kadar 6,6% sampai 7,4% dan campuran dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* pada kadar 6,7% sampai 7,5% sudah memasuki spesifikasi SNI 8129:2015 yaitu 4 – 5%. Pada kadar yang sama, nilai *VITM* pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* sedikit lebih tinggi. Hasil

ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ritongga dan Winsyahputra (2013), penelitian tersebut menyimpulkan bahwa tingginya nilai *VITM* pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dikarenakan oleh sifat aspal *Crumb Rubber* yang lebih kaku dibandingkan aspal Pen 60/70 sehingga menimbulkan *void* yang besar pada campuran perkerasan. Perbandingan kekakuan pada kedua jenis aspal secara rinci dapat dilihat dari perhitungan nilai *S<sub>bit</sub>* dan grafik Vander Poel yang terdapat pada Lampiran 40 dengan asumsi kecepatan kendaraan sebesar 40 km/jam, panjang tapak kontak ban dengan perkerasan sebesar 20 cm, dan temperatur perkerasan sebesar 41°C.

## 2. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap *VFWA* (*Void Filled with Asphalt*)

*VFWA* adalah persentase nilai yang menunjukkan banyaknya rongga dalam suatu campuran yang terisi oleh aspal. Nilai *VFWA* yang terlalu rendah akan menyebabkan campuran bersifat porous dan mudah teroksidasi, menyebabkan ikatan antar agregat menurun dan kinerja campuran menjadi rendah. Sebaliknya, Nilai *VFWA* yang besar menyebabkan campuran menjadi lentur karena rongga campuran cukup terisi oleh aspal. Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai *VFWA* adalah gradasi agregat, kadar aspal, jumlah dan temperatur pemadatan. Berikut ini adalah grafik hasil perbandingan nilai *VFWA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

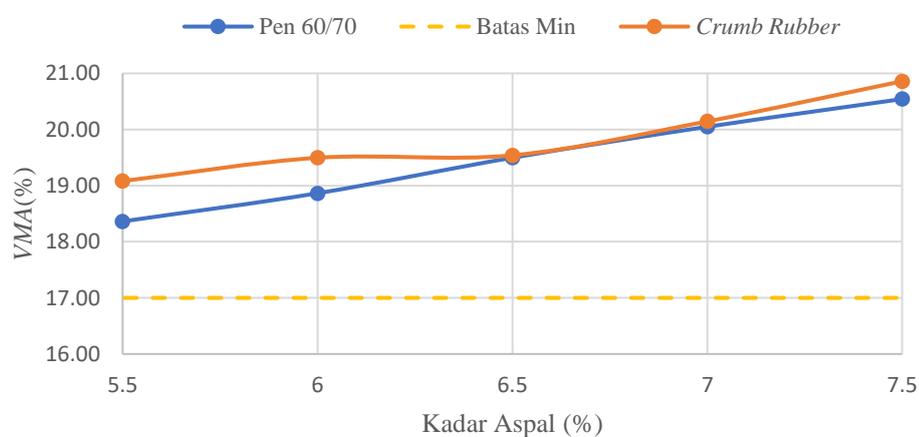


**Gambar 5.10 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VFWA***

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.10 dapat dilihat bahwa nilai *Void Filled With Asphalt (VFWA)* akan terus meningkat seiring dengan bertambahnya penggunaan kadar aspal. Pada kadar yang sama, nilai *VFWA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5mm dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan dengan bahan ikat aspal Pen 60/70. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ritongga dan Winsyahputra (2013) pada penggunaan modifikasi aspal dengan menggunakan karet alam siklit yang mengakibatkan penurunan nilai rongga yang terisi aspal (*VFA*). Tingginya nilai *VFWA* pada campuran perkerasan dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dibandingkan aspal *Crumb Rubber* dikarenakan aspal Pen 60/70 memiliki penetrasi lebih tinggi atau lebih lunak sehingga mudah mencair.

### 3. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap *VMA (Void in Mineral Agregate)*

*VMA* yaitu rongga udara antar butir agregat aspal padat yang dinyatakan dalam persentase. Nilai *VMA* akan naik berdasarkan naiknya kadar aspal, dan semakin tinggi nilai *VMA* maka kedekatan campuran terhadap air dan udara semakin tinggi, karena semakin banyak rongga dalam campuran yang terisi aspal. Nilai *VMA* digunakan sebagai ruang untuk menampung aspal dan rongga udara yang dibutuhkan dalam campuran agregat aspal. Berikut ini adalah grafik hasil perbandingan nilai *VMA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

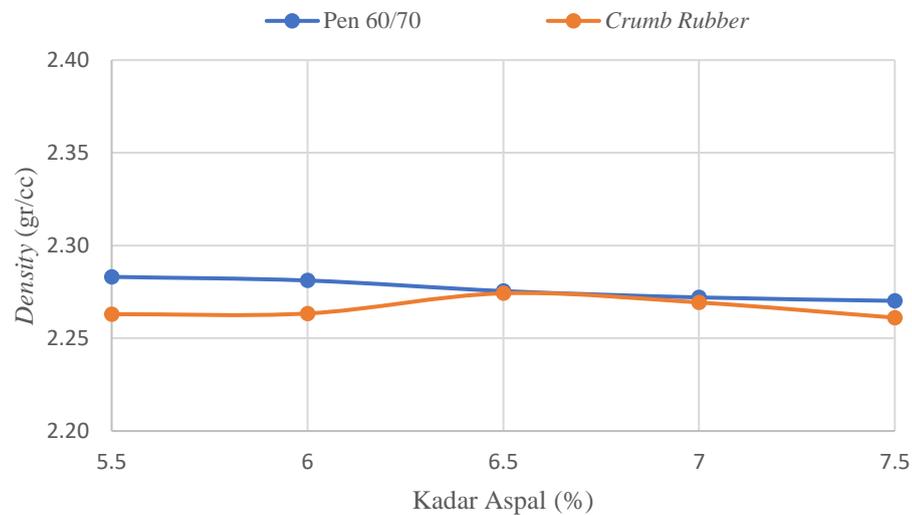


**Gambar 5.11 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VMA***

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.11 di atas, dapat dilihat bahwa nilai *Void In Mineral Agregate (VMA)* akan terus meningkat dengan adanya penambahan kadar aspal yang digunakan. Pada penggunaan kadar aspal yang sama, nilai *VMA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 kecuali pada kadar aspal 6,5 % sampai 7 % menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Ritongga dan Wildansyah (2013) pada penggunaan modifikasi aspal dengan menggunakan karet alam siklit. Tingginya nilai *VMA* pada campuran perkerasan dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki penetrasi yang lebih rendah dan memiliki titik leleh yang tinggi, sehingga lebih sulit dalam mengisi rongga antar butiran agregat dan mengakibatkan aspal yang menyelimuti agregat semakin kecil.

#### 4. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Kepadatan (*density*)

Nilai kepadatan atau *density* menunjukkan tingkat kerapatan suatu campuran setelah dipadatkan. Semakin meningkatnya kadar aspal maka nilai *density* akan semakin naik sehingga campuran tersebut semakin rapat dan padat, karena semakin meningkatnya kadar aspal, maka semakin besar juga jumlah aspal yang dapat mengisi rongga antar butir pada volume campuran. Nilai *density* dapat dipengaruhi oleh faktor gradasi bahan, jumlah pemadatan, temperatur pemadatan, dan penggunaan kadar aspal dalam campuran. Berikut ini adalah hasil perbandingan nilai *VMA* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.

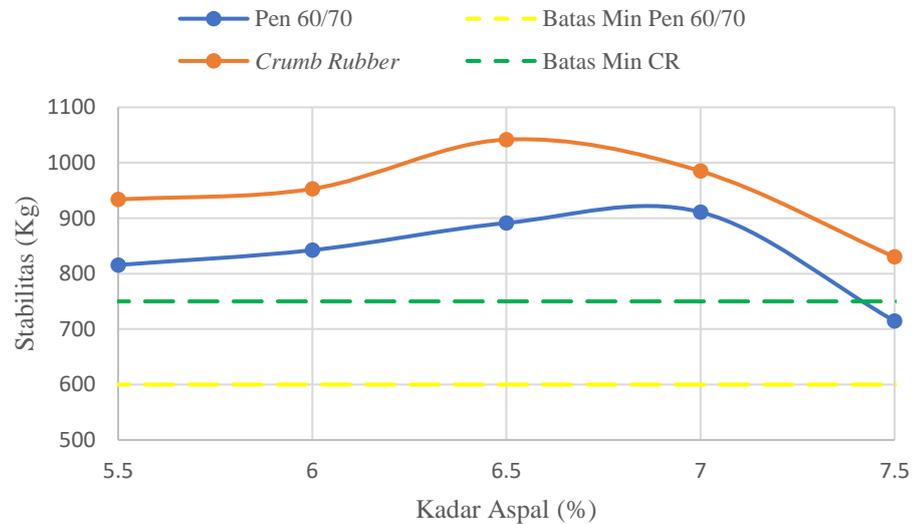


**Gambar 5.12 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Density***

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.12 dapat dilihat bahwa nilai kepadatan (*density*) pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat Aspal Pen 60/70 lebih tinggi dibandingkan dengan berbahan ikat aspal *Crumb Rubber*. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ritonga dan Winsyahputra (2013) pada penggunaan modifikasi aspal dengan menggunakan karet alam siklit. Tingginya nilai kepadatan (*density*) pada campuran berbahan ikat Pen 60/70 dikarenakan aspal Pen 60/70 memiliki sifat yang lebih mudah mencair dibandingkan aspal *Crumb Rubber*. Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada kadar 6% mengalami penurunan, hal ini disebabkan oleh proses pemadatan yang kurang baik sehingga nilai kepadatannya berkurang.

#### 5. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas dimaksudkan agar perkerasan mampu mendukung beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk. Stabilitas diperoleh dari gesekan antar partikel, gaya pengunci, dan gaya adhesi yang baik antara butuan dan aspal. Gaya-gaya tersebut dipengaruhi oleh kekerasan batuan, ukuran gradasi, bentuk butiran, kadar aspal, dan tingkat kepadatan campuran. Berikut ini adalah hasil perbandingan nilai stabilitas pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.



**Gambar 5.13 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas**

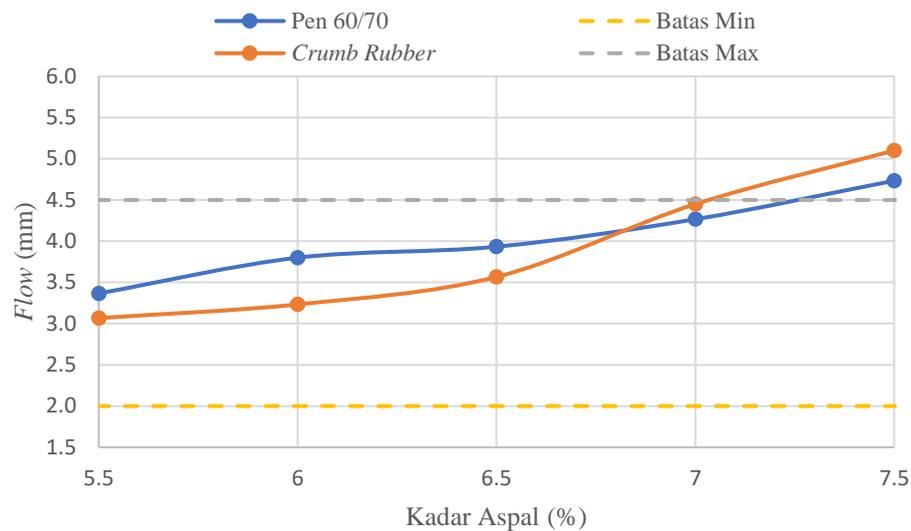
Berdasarkan grafik nilai stabilitas pada Gambar 5.13 dapat disimpulkan bahwa nilai stabilitas akan menurun ketika telah mencapai batas maksimum pada penggunaan kadar aspal. Hal ini dikarenakan adanya perubahan fungsi aspal, yang sebelumnya berfungsi sebagai pengikat berubah menjadi pelicin akibat penggunaan kadar aspal yang terlalu banyak.

Pada kadar aspal yang sama, nilai stabilitas pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan campuran yang berbahan ikat Pen 60/70. Hasil ini sejalan dengan penelitian Wiranata, A (2018) pada penggunaan mistikasi karet terhadap karakteristik campuran aspal. Tingginya nilai stabilitas pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dikarenakan campuran memiliki sifat yang cenderung lebih kaku dibandingkan campuran berbahan ikat Pen 60/70. Secara rinci, perbandingan kekakuan antara campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dengan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat dari nilai modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) pada Lampiran 40 sampai dengan Lampiran 43.

#### 6. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan plastis (*flow*) merupakan indikator terhadap lentur suatu campuran aspal. Kelelehan plastis adalah keadaan perubahan bentuk suatu

campuran yang terjadi akibat suatu beban sampai batas runtuh. Berikut ini adalah hasil perbandingan nilai *flow* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.



**Gambar 5.14 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow***

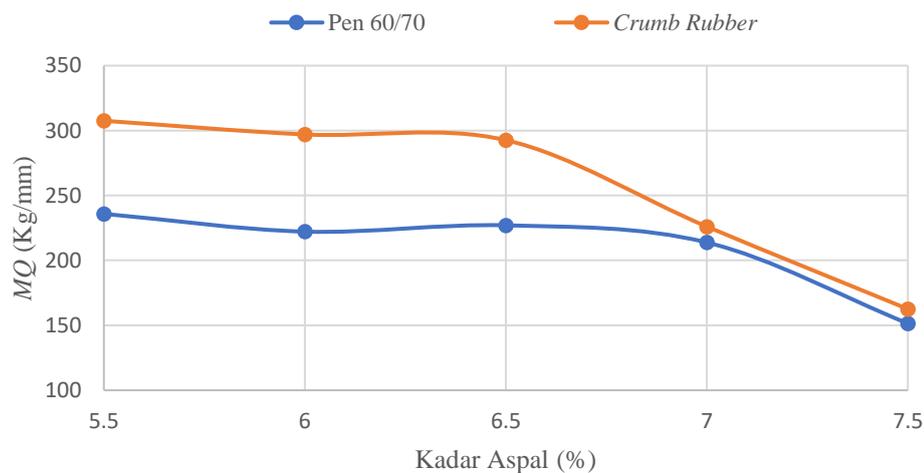
Berdasarkan grafik pada Gambar 5.14 dapat disimpulkan bahwa nilai kelelehan (*flow*) akan terus meningkat seiring dengan adanya penambahan kadar aspal yang dilakukan. Hal ini dikarenakan dengan adanya penambahan kadar aspal maka rongga yang terisi oleh aspal akan semakin besar dan membuat campuran semakin fleksibel.

Pada campuran campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 kadar 5,5% sampai 7,25% dan campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5 mm dengan bahan ikat aspal *Crumb rubber* pada kadar 5,5% sampai 7% sudah memasuki spesifikasi SNI 8129:2015 yang sudah ditetapkan dengan batas maksimal nilai *flow* yaitu sebesar 4,5%. Pada kadar yang sama, nilai *flow* pada campuran SMA 12,5 mm dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih rendah dibandingkan dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 kecuali pada kadar aspal 7% dan 7,5% menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Purnomo dkk (2014) pada pemanfaatan *Crumb rubber* sebagai aspal modifikasi polimer.

Penggunaan aspal modifikasi *Crumb Rubber* dengan kadar aspal yang sesuai menghasilkan daya kohesi yang tinggi dan memiliki kemampuan lentur yang baik.

#### 7. Analisis Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *MQ* (*Marshall Quotient*)

Nilai *MQ* diperoleh dari rasio nilai stabilitas terhadap *flow*. Nilai *MQ* yang tinggi menunjukkan campuran tersebut kaku dan fleksibilitasnya rendah, dengan demikian akan mudah terjadi *cracking* akibat beban lalu lintas yang berulang-ulang. Sebaliknya nilai *MQ* yang rendah menunjukkan campuran terlalu fleksibel yang mengakibatkan lapis keras akan mudah berubah bentuk bila menahan beban lalu lintas. Berikut ini adalah hasil perbandingan nilai *MQ* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.



**Gambar 5.15 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *MQ***

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.15 dapat dilihat pada campuran *SMA* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada kadar 6,5% mengalami penurunan. Penurunan nilai *Marshall Quotient (MQ)* berkaitan dengan perbandingan nilai stabilitas dan nilai *flow* yang didapatkan sebelumnya, hal ini disebabkan tingginya nilai stabilitas dan *flow* pada kadar aspal 6,5 %, 7 %, dan 7,5% menyebabkan campuran menjadi lentur dan semakin elastis akibat penambahan kadar aspal. Pada penggunaan kadar aspal

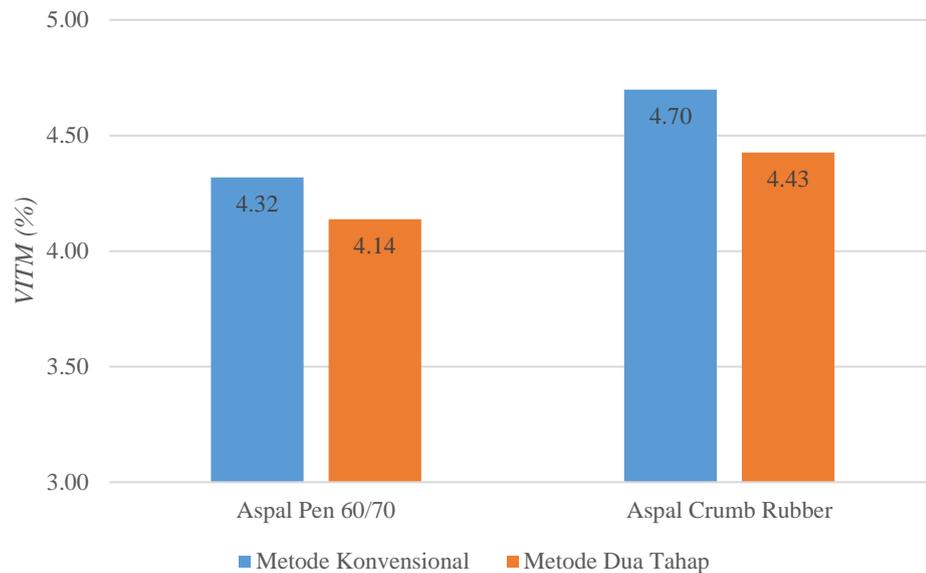
yang sama, nilai *Marshall Quotient (MQ)* pada campuran SMA 12,5 mm dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan campuran SMA 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Wiranata, A (2018) pada penggunaan mistikasi karet terhadap campuran aspal. Tingginya nilai *Marshall Quotient (MQ)* pada campuran perkerasan dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki sifat yang padat dan keras yang juga diikuti nilai daktilitas yang rendah sehingga aspal *Crumb Rubber* memiliki kemampuan lentur yang baik.

#### **5.2.6 Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Marshall* Pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm, didapat nilai KAO aspal Pen 60/70 sebesar 6,985% dan KAO aspal *Crumb Rubber* sebesar 6,850%. Setelah KAO diperoleh, dibuat spesimen dengan 2 metode pencampuran, yaitu metode pencampuran secara konvensional dan metode pencampuran dua tahap yang didasarkan pada pelapisan awal agregat kasar dengan jumlah bahan ikat aspal sesuai kadar aspal optimum (KAO). Sebagai pembandingnya, sampel dibuat menggunakan dua bahan ikat yaitu aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber*. Hasil pengujian dapat dilihat pada pembahasan berikut.

##### **1. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Void In The Mix (VITM)***

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *VITM* menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.16 berikut ini.



**Gambar 5.16 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai VITM Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

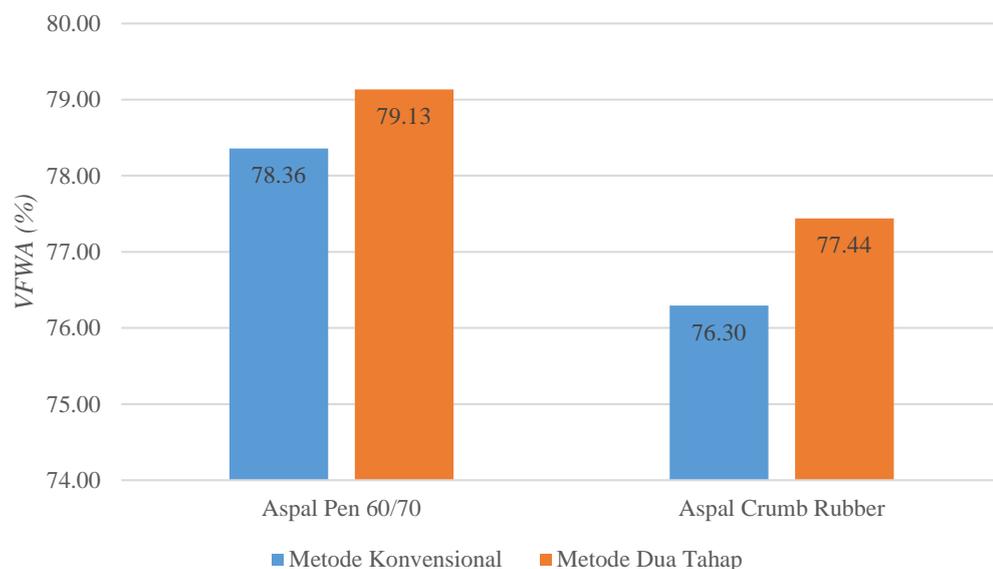
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.16 di atas dapat diketahui bahwa pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *VITM* menunjukkan perbedaan hasil yang tidak signifikan, namun penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* menghasilkan nilai *VITM* yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Hal ini dipengaruhi oleh pelapisan awal agregat kasar dengan aspal sehingga membuat rongga – rongga kecil yang terdapat pada campuran SMA 12,5 mm dapat terisi oleh kedua aspal tersebut. Penelitian ini sejalan dengan Kok dan Kologlu (2011) yang menyatakan bahwa metode pencampuran dua fase mampu membuat aspal menembus ke *microvoid* agregat kasar sehingga *void*/rongga cenderung lebih rendah.

Dapat dilihat pula Gambar 5.16 grafik perbandingan nilai *VITM* campuran SMA 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* memiliki perbedaan namun tidak secara signifikan. Campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai *VITM* lebih tinggi dari campuran berbahan

ikat aspal Pen 60/70. Hal ini dikarenakan partikel serpihan karet masuk ke dalam partikel aspal dan menyerap minyak yang terkandung dalam aspal sehingga serpihan karet pada aspal akan mengembang saat di panaskan dan menghasilkan rongga. Hasil ini sejalan dengan penelitian Ritongga dan Winsyahputra (2013) yang menyatakan penggunaan modifikasi aspal karet meningkatkan nilai *VIM* pada campuran beraspal.

## 2. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Void Filled With Asphalt (VFWA)*

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan nilai *VFWA* terhadap metode pencampuran dua tahap menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.17 berikut ini.



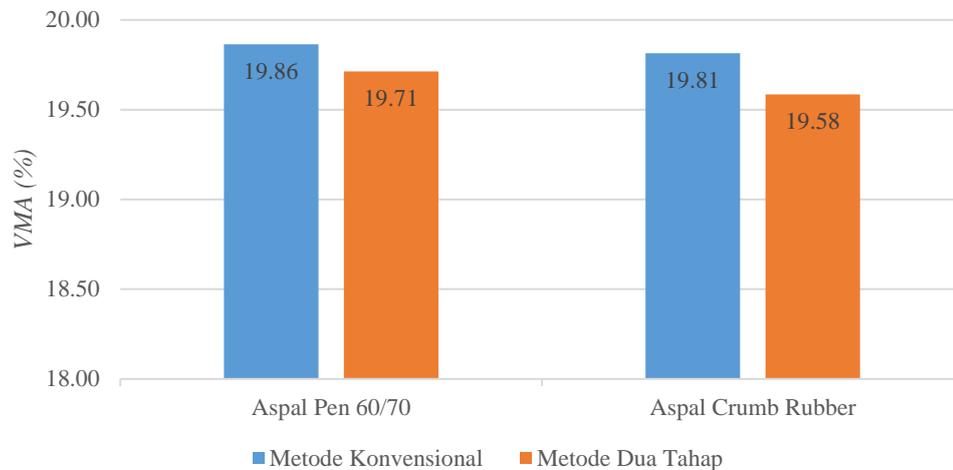
**Gambar 5.17 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *VFWA* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.17 diatas, pengaruh metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* menunjukkan perbedaan nilai VFWA namun tidak secara signifikan. Penggunaan metode pencampuran dua tahap berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* menghasilkan nilai VFWA yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Hal ini disebabkan karena tingginya volume pori beton aspal padat yang terisi oleh aspal akibat dari penggunaan metode pencampuran dua tahap. Hasil ini sejalan dengan Kok dan Kologlu (2011) tentang pengaruh metode pencampuran dua fase yang menyatakan bahwa penggunaan metode tersebut mampu mengurangi nilai *void* pada campuran sehingga campuran semakin kedap air dan udara.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dalam grafik pada Gambar 5.17 di atas memiliki nilai VFWA yang lebih rendah dibandingkan dengan campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70. Hal tersebut disebabkan karena pada saat proses pencampuran aspal *Crumb Rubber* dengan agregat, partikel karet memenuhi ruang antara partikel-partikel aspal, sehingga jarak antar partikel aspal menjadi berkurang akibat adanya pemanasan dan membuat penyelimutan aspal menjadi rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ritonga dan Winsyahputra (2013) pada penggunaan modifikasi aspal dengan menggunakan karet alam siklit yang mengakibatkan penurunan rongga yang terisi aspal (VFA).

### 3. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Void Mineral Aggregate (VMA)*

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan nilai VMA terhadap metode pencampuran dua tahap menggunakan aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.18 berikut ini.



**Gambar 5.18 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai VMA Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

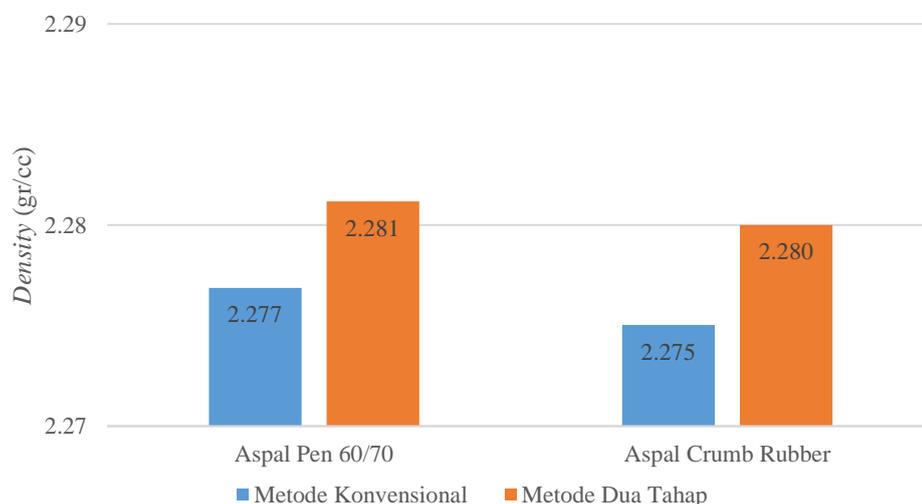
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.18 diatas dapat diketahui bahwa grafik perbandingan nilai *VMA* pada penggunaan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap menghasilkan perbedaan nilai *VMA* yang tidak signifikan. Campuran SMA 12,5 mm berbahan ikan aspal Pen 60/7 dan aspal *Crumb Rubber* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai *VMA* yang lebih rendah daripada dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Hal ini terjadi karena metode pencampuran dua tahap mampu membuat ikatan adhesi meningkat sehingga jarak antar butir agregat pada campuran menjadi lebih rapat. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Kok dan Kologlu (2011) yang menyatakan penggunaan metode dua fase mampu meningkatkan ikatan adhesi pada campuran beraspal sehingga kemampuan aspal untuk mengikat agregat dalam campuran lebih tinggi.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dalam grafik pada Gambar 5.18 di atas memiliki nilai *VMA* yang lebih rendah namun tidak secara signifikan. Hal ini disebabkan karena selimut aspal pada campuran aspal *Crumb Rubber* lebih rendah sehingga campuran menjadi kedap air dan udara. Hasil ini sejalan dengan penelitian Ritongga dan Winsyahputra (2013) pada penggunaan modifikasi aspal dengan menggunakan

karet alam siklit mampu membuat campuran menjadi lebih kedap air jika dibandingkan dengan aspal murni.

#### 4. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Kepadatan (*Density*)

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan nilai *Density* terhadap metode pencampuran dua tahap menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.19 berikut ini.



**Gambar 5.19 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Density* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

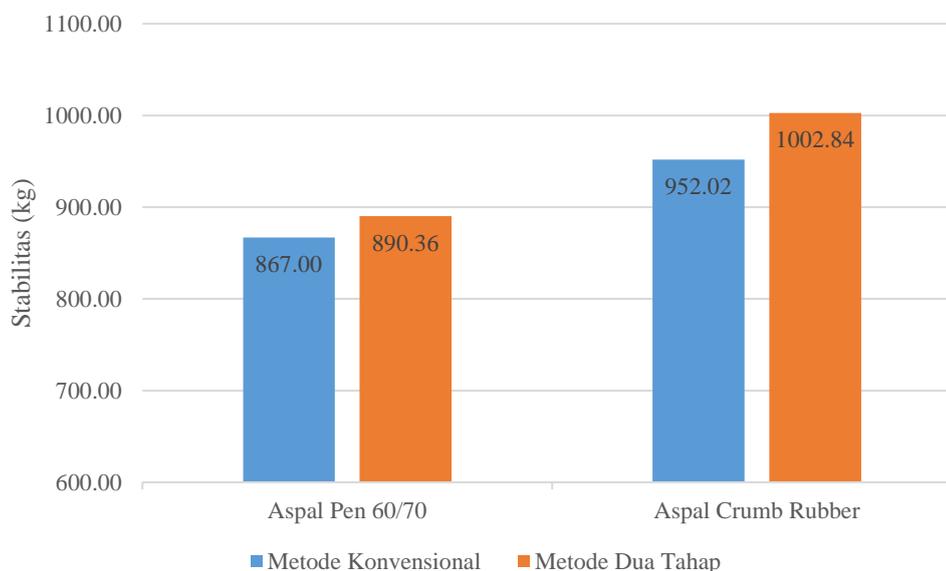
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.19 di atas dapat diketahui bahwa grafik perbandingan nilai *Density* pada penggunaan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap menghasilkan perbedaan nilai *Density* yang tidak signifikan. Campuran SMA 12,5 mm berbahan ikan aspal Pen 60/7 dan aspal *Crumb Rubber* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai *Density* yang tinggi. Hal ini dikarenakan jumlah rongga-rongga antar butiran lebih sedikit, sehingga kepadatan campuran semakin meningkat. Hal tersebut sejalan dengan penelitian

Huang (2005) yang menyatakan pelapisan awal agregat dengan aspal mampu mengurangi jumlah rongga antar butiran.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dalam grafik perbandingan pada Gambar 5.19 di atas memiliki nilai *Density* yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena aspal *Crumb Rubber* memiliki sifat yang lebih susah mencair dibandingkan aspal Pen 60/70 menyebabkan kepadatan campuran menjadi lebih rendah walaupun perbedaannya tidak signifikan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Wiranata, A (2018) yang menyatakan aspal *Crumb Rubber* lebih melekatkan agregat dibandingkan dengan aspal aspal Pen 60/70 sehingga campuran menjadi lebih padat.

#### 5. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Stabilitas

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan nilai Stabilitas terhadap metode pencampuran dua tahap menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.20 berikut ini.



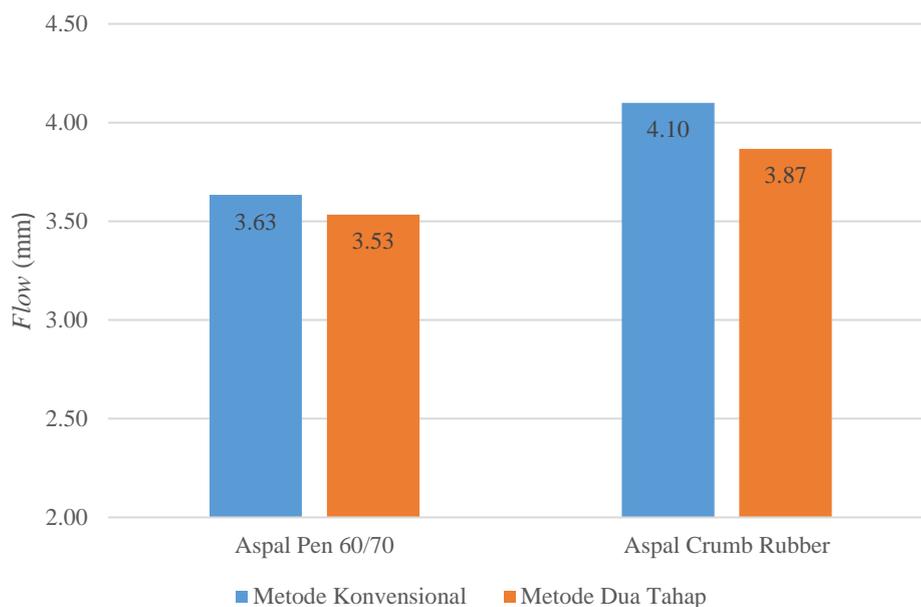
**Gambar 5.20 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Stabilitas Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.20 dapat dilihat bahwa nilai stabilitas campuran SMA 12,5 mm dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap signifikan lebih tinggi dari metode pencampuran konvensional. Penggunaan metode pencampuran dua tahap mampu meningkatkan nilai Stabilitas sehingga campuran memiliki kemampuan lebih tinggi dalam menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk seperti gelombang, alur, ataupun *bleeding* daripada dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm sehingga mampu meningkatkan durabilitas beton aspal. Hal tersebut terjadi karena metode pencampuran dua tahap mampu memperkecil rongga antar agregat sehingga campuran memiliki kinerja yang lebih baik dalam menahan beban. Penelitian ini sejalan dengan Kok dan Kologlu (2011) yang menyatakan bahwa terjadi *interlocking* yang sangat baik pada agregat kasar berkat metode pencampuran dua fase sehingga mampu memberikan nilai stabilitas yang tinggi.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dalam grafik stabilitas pada Gambar 5.20 di atas memiliki perbedaan yang signifikan. Nilai stabilitas dengan menggunakan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70. Tingginya nilai stabilitas pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dikarenakan campuran memiliki sifat yang cenderung lebih kaku dibanding campuran berbahan ikat aspal Pen 60/70. Nilai stabilitas pada penelitian ini sejalan dengan Purnomo, dkk (2014) yang menyatakan aspal modifikasi *Crumb Rubber* mempunyai nilai penetrasi yang lebih sehingga campuran dengan bahan ikat aspal modifikasi *Crumb Rubber* menjadi lebih kaku, membuat campuran lebih stabil, elastis, dan dapat memberikan nilai stabilitas yang lebih tinggi. Perbandingan tingkat kekakuan aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat dari nilai modulus bitumen  $S_{bit}$  pada Lampiran 40 sampai dengan Lampiran 43.

## 2. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Kelelehan (*Flow*)

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan nilai *Flow* terhadap metode pencampuran dua tahap menggunakan aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.21 berikut ini.



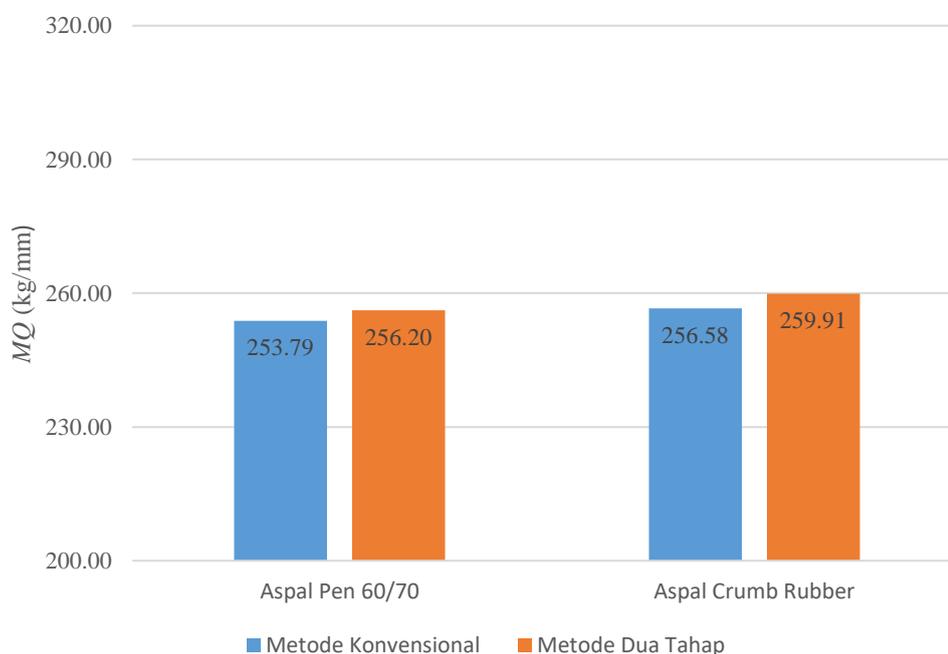
**Gambar 5.21 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Flow* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.21 dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan nilai *Flow* yang signifikan antara metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran konvensional. Penggunaan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai *Flow* yang lebih rendah dari penggunaan metode konvensional. Hal tersebut dikarenakan rendahnya nilai *VITM* dengan metode pencampuran dua tahap, sehingga daya ikat antara agregat dan aspal menjadi lebih baik mengakibatkan campuran menjadi lebih kaku, namun cenderung terjadinya *cracking*. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hasemi (2015) yang menyatakan hasil dari penelitian ini efek dari perubahan urutan pencampuran aspal menghasilkan perilaku campuran yang lebih kaku.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dalam grafik pada Gambar 5.21 di atas secara signifikan memiliki nilai *flow* yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan aspal Pen 60/70. Hal ini disebabkan karena aspal *Crumb Rubber* memiliki daya kohesi yang tinggi sehingga memiliki kemampuan lentur yang baik. Penelitian ini sejalan dengan jurnal Ritonga dan Wilsyahputra (2013) yang menyatakan bahwa penurunan daktilitas merupakan akibat terserapnya minyak dalam aspal karet oleh partikel karet alam tersebut sehingga nilai *elastic recovery* cenderung lebih tinggi.

### 3. Analisis Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Marshall Quotient (MQ)*

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat diperoleh grafik perbandingan nilai *MQ* terhadap metode pencampuran dua tahap menggunakan aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.22 berikut ini.



**Gambar 5.22 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *MQ* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

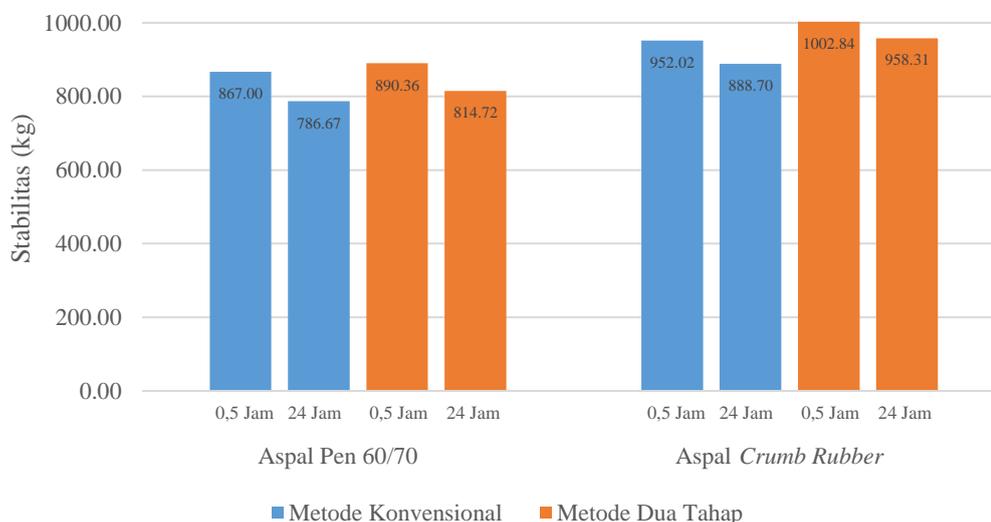
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.22 dapat dilihat bahwa nilai *MQ* campuran *SMA* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap lebih tinggi dari metode pencampuran konvensional walaupun tidak signifikan, yang artinya penggunaan metode pencampuran dua tahap dapat menambah campuran aspal menjadi tahan terhadap beban berat, bersifat kaku, dan tidak mudah mengalami deformasi plastis sehingga baik digunakan untuk jalan raya. Hasil ini sedikit berbeda dengan penelitian Kok dan Kologlu (2011) yaitu penggunaan metode pencampuran dua fase dapat meningkatkan nilai *MQ*.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* dalam grafik pada Gambar 5.22 di atas memiliki nilai *MQ* yang lebih tinggi namun tidak secara signifikan dibandingkan dengan penggunaan aspal Pen 60/70. Hal ini disebabkan tingginya nilai stabilitas dan nilai *flow*, sehingga pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* memiliki kemampuan yang lebih dalam menahan kelelahan plastis dan meningkatkan ketahanan gesar. Hal ini sejalan dengan penelitian Ritonga dan Winsyahputra (2013) yang menyatakan penggunaan modifikasi aspal menggunakan karet alam siklit dapat meningkatkan nilai *Marshall Quetient*.

### **5.2.7 Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Immersion Test* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

#### **1. Stabilitas Rendaman**

Stabilitas rendaman adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui perubahan karakteristik dari campuran akibat adanya perubahan suhu, cuaca, dan air. Perendaman dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu dengan perendaman di *waterbath* dengan suhu 60°C selama 0,5 jam dan perendaman di *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam. Grafik perbandingan metode pencampuran dua tahap terhadap nilai rendaman 0,5 jam dan 24 jam pada campuran *SMA* 12,5mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Gambar 5.23 berikut ini dan rincinya dapat dilihat pada Lampiran 28 dan Lampiran 29.



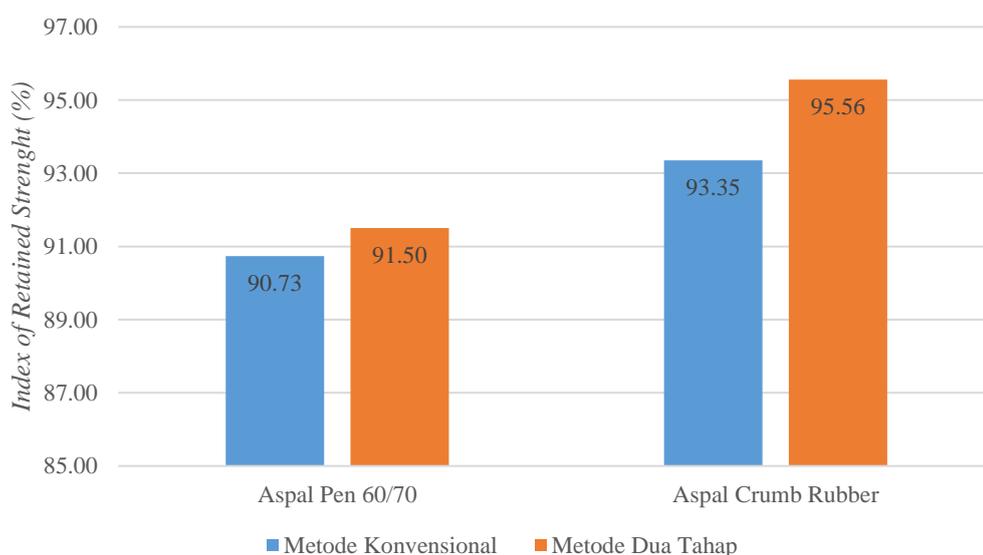
**Gambar 5.23 Grafik Perbandingan antara Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai Stabilitas *Marshall* 0,5 jam dan 24 jam Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Nilai stabilitas pada Gambar 5.23 di atas, campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada rendaman *waterbath* 24 jam lebih rendah dibandingkan dengan rendaman 0,5 jam. Hal ini dikarenakan pada proses perendaman 24 jam di *waterbath*, pori-pori campuran akan lebih terisi oleh air dari pada perendaman 0,5 jam sehingga akan mengurangi ikatan antara aspal dan agregat pada suatu perkerasan. Nilai stabilitas rendaman pada penggunaan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai stabilitas rendaman yang lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal ini dikarenakan pelapisan awal agregat kasar dengan aspal sehingga pori-pori campuran lebih terisi oleh aspal dan membuat film atau selimut aspal menjadi lebih tebal yang terbukti dari nilai *VFWA* campuran dengan metode dua tahap lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional.

Pada Gambar 5.23 Nilai stabilitas rendaman campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5mm dengan bahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi daripada campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70. Hal tersebut dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai Indeks Penetrasi yang lebih tinggi dari aspal Pen 60/70, sehingga aspal *Crumb Rubber* memiliki kepekaan yang rendah terhadap perubahan temperatur akibat dari pengaruh rendaman.

## 2. *Index of Retained Strength (IRS)*

Nilai *IRS* didapatkan dari proses perendaman, untuk mengevaluasi keawetan campuran setelah mengalami proses perendaman selama 24 jam pada suhu 60°C terhadap perendaman 0,5 jam pada suhu 60°C. Nilai ini didapat dari hasil perbandingan nilai stabilitas 24 jam dengan rendaman 0,5 jam yang kemudian diubah kebentuk persen, sehingga hasil perbandingan dapat diketahui secara jelas. Berikut ini Gambar 5.24 grafik perbandingan antara metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *IRS* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*.



**Gambar 5.24 Grafik Perbandingan antara Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Index of Retained Strength* Menggunakan Bahan Ikat aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

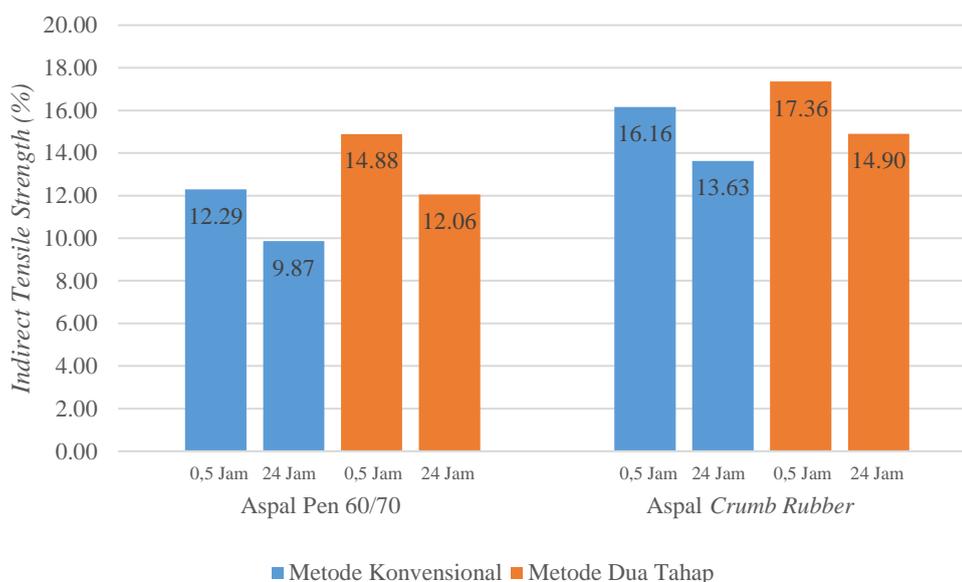
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.24 dapat dilihat bahwa penggunaan metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran konvensional memiliki perbedaan nilai *IRS* yang signifikan. Penggunaan metode pencampuran dua tahap mampu meningkatkan nilai *IRS* dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm sehingga mampu meningkatkan durabilitas beton aspal. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Huang (2005) yang menyatakan pelapisan awal agregat kasar dengan aspal dapat meningkatkan keawetan aspal terhadap pengaruh cuaca, iklim atau perubahan suhu.

Pada Gambar 5.24 juga dapat dilihat bahwa penggunaan aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm memiliki perbedaan nilai *IRS* yang signifikan. Nilai *IRS* pada campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan campuran berbahan ikat aspal Pen 60/70. Hal ini dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki ketahanan terhadap perubahan suhu yang baik dibandingkan aspal Pen 60/70. Keberadaan serpihan karet pada aspal *Crumb Rubber* berperan dalam meningkatkan ketahanan aspal terhadap oksidasi Purnomo, dkk (2014) yang menyimpulkan pemanfaatan *crumb rubber* sebagai aditif aspal modifikasi aspal polimer dapat meningkatkan durabilitas campuran.

#### **5.2.8 Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Indirect Tensile Strength (ITS)* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Pengujian *ITS* yang bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tarik dari campuran beton aspal akibat beban lalu lintas yang diterima. Nilai *ITS* yang tinggi menunjukkan campuran beton aspal memiliki kuat tarik yang baik. Pada penelitian ini pengujian *ITS* dilakukan 2 tipe pengujian yaitu menggunakan metode pengujian *ITS uncondition* yaitu pengujian kuat tarik tidak langsung awal ( $\text{kg/cm}^2$ ) dan pengujian *ITS condition* yaitu pengujian kuat tarik tidak langsung yang di uji setelah rendaman *waterbath* 24 jam ( $\text{kg/cm}^2$ ). Grafik perbandingan metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *ITS uncondition* dan *ITS Condition* pada campuran *Stone*

*Matrix Asphalt (SMA) 12,5mm* dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Gambar 5.25 berikut ini dan rincinya dapat dilihat pada Lampiran 33 dan Lampiran 34.



**Gambar 5.25 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *ITS Uncondition* dan *ITS Condition* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

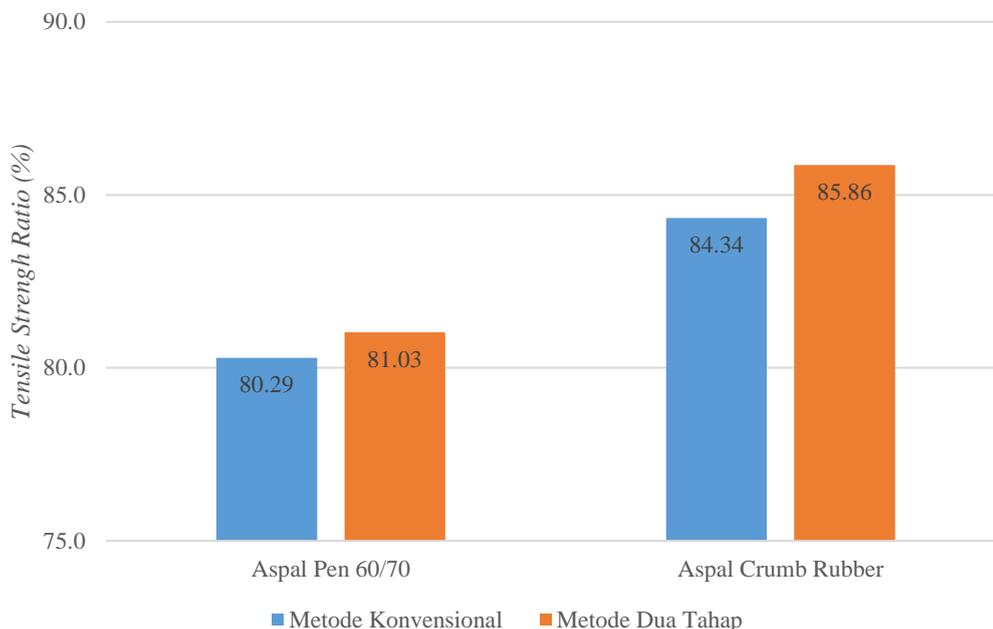
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.25 campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5mm* dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada nilai *ITS condition* lebih rendah dibandingkan dengan nilai *ITS uncondition*. Hal ini dikarenakan proses perendaman 24 jam di *waterbath* dapat mempengaruhi penurunan kinerja perkerasan seperti perkerasan yang melunak, berkurangnya ikatan antar aspal dan agregat serta kemungkinan mengalami keretakan yang tinggi. Pada hasil menggunakan analisis statistik *Anova*, diketahui bahwa pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *ITS condition* dan *ITS uncondition* pada campuran *SMA 12,5 mm* dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* mendapatkan perbedaan nilai yang signifikan. Penggunaan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai *ITS condition* dan *ITS uncondition* lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan

metode pencampuran konvensional. Hal tersebut dikarenakan campuran dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai modulus kekakuan campuran ( $S_{mix}$ ) yang lebih tinggi dari penggunaan metode pencampuran konvensional yang berarti campuran dengan metode pencampuran dua tahap mampu mengurangi potensi terjadinya retak akibat kegagalan gaya tarik. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hasemi, dkk (2015) tentang pengaruh urutan pencampuran terhadap kinerja campuran aspal, yang menyatakan bahwa efek sistem metode pencampuran dua fase lebih menonjol dan dapat meningkatkan nilai kuat tarik tidak langsung, serta dapat mengurangi kemungkinan terjadinya keretakan yang tinggi.

Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* pada Gambar 5.25 di atas mempunyai nilai *ITS condition* dan *ITS uncondition* yang lebih tinggi dibandingkan aspal Pen 60/70. Hal ini disebabkan karena rendahnya nilai penetrasi dan tingginya nilai titik lembek pada aspal *Crumb Rubber* berarti bahwa aspal karet menjadi semakin keras, serta tahan terhadap perubahan suhu dibandingkan dengan aspal Pen 60/70. Hasil ini sejalan dengan penelitian Ritonga dan Winsyahputra (2013) tentang modifikasi aspal menggunakan karet alam siklit yang menyatakan sifat modifikasi aspal menggunakan karet alam cenderung lebih kaku dan tidak mudah mengalami deformasi plastis.

#### **5.2.9 Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Tensile Strength Ratio (TSR)* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Hasil pengujian *TSR* yaitu perbandingan nilai kuat tarik pada campuran antara *ITS uncondition* dan *ITS condition*. Nilai *TSR* harus lebih besar dari 80% sesuai dengan persyaratan SNI 8129:2015. Grafik perbandingan metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *TSR* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Gambar 5.26 berikut ini.



**Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *TSR* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

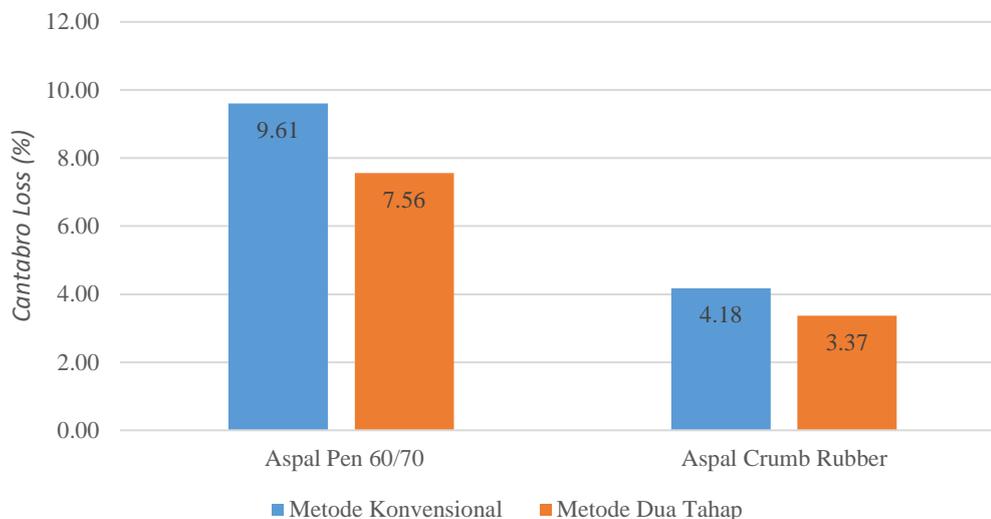
Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.26 dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan nilai *TSR* yang signifikan antara metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran konvensional. Penggunaan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai *TSR* yang lebih tinggi dari penggunaan metode konvensional. Hal tersebut menandakan bahwa penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* mampu mengurangi terjadinya keretakan akibat kegagalan gaya tarik terhadap pengaruh cuaca, iklim atau perubahan suhu. Penelitian ini sejalan dengan Kok dan Kologlu (2011) yang menyatakan bahwa metode pencampuran dua fase dapat meningkatkan pelekatan aspal pada permukaan agregat sehingga campuran ini tahan terhadap pengaruh air dan suhu.

Pada Gambar 5.26 juga dapat dilihat bahwa penggunaan aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm memiliki perbedaan nilai *TSR* yang signifikan. Nilai *TSR* pada campuran

berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* lebih tinggi dibandingkan campuran berbahan ikat aspal Pen 60/70. Hal tersebut dikarenakan aspal *Crumb Rubber* memiliki nilai *PI* yang lebih tinggi dari aspal Pen 60/70 yang berarti aspal *Crumb Rubber* memiliki kepekaan yang rendah terhadap temperatur sehingga membuat ikatan antar agregat akan lebih kuat dalam menerima beban secara vertikal serta akan memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan penurunan nilai *TSR* akibat suhu dan kelembaban. Penelitian ini sejalan dengan Wiranata, A (2018) yang menyatakan pengaruh mistikasi karet terhadap campuran aspal menghasilkan nilai indeks penetrasi yang rendah sehingga campuran aspal menjadi lebih kuat terhadap tarik pada perendaman dan menghasilkan daya lekat dan daya dukung aspal terhadap suhu dan beban yang tinggi.

#### **5.2.10 Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Cantabro Loss* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

*Cantabro Test* adalah suatu metode pengujian yang dilakukan untuk mengetahui ketahanan benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Loss Angeles* dengan jumlah putaran sebanyak 300 kali tanpa bola baja. Pengujian *Cantabro Test* dilakukan untuk mengetahui besarnya batas kekuatan hancur akibat pengaruh *impact* (tumbukan/pembebanan) beban roda lalu lintas pada lapis perkerasan dan mengetahui kehilangan berat dari benda uji setelah dilakukan tes abrasi. Grafik perbandingan metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *cantabro loss* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada Gambar 5.27 berikut ini dan rincinya dapat dilihat pada Lampiran 36.



**Gambar 5.27 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Nilai *Cantabro Loss* Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.26 dapat dilihat bahwa persentasi perbandingan nilai *Cantabro Loss* dengan penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb* secara signifikan lebih rendah daripada penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal ini terkait dengan nilai *ITS* metode pencampuran dua tahap lebih tinggi dari metode pencampuran konvensional yang berarti campuran dengan metode pencampuran dua tahap menghasilkan kemampuan daya dukung dan daya lekat yang lebih baik sehingga dapat memperlambat pengelupasan aspal dari campuran akibat dari beban lalu lintas. Penelitian ini sejalan dengan Huang (2005) yang menyatakan pelapisan awal agregat dengan aspal dapat memberikan daya rekat yang tinggi antara agregat dengan aspal sehingga campuran menghasilkan gaya adhesi yang lebih baik dari campuran konvensional.

Hasil nilai *Cantabro Loss* pada Gambar 5.26 di atas, campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* menghasilkan nilai *Cantabro* signifikan lebih tinggi dan lebih baik dibandingkan dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 . Hal ini dikarenakan campuran berbahan ikat aspal *Crumb*

*Rubber* memiliki nilai kuat tarik yang lebih tinggi dari aspal Pen 60/70 sehingga campuran berbahan ikat aspal *Crumb Rubber* memiliki daya kohesi yang tinggi dan memiliki ketahanan terhadap keausan dengan baik. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Purnomo, dkk (2014) yang menyatakan pemanfaatan *Crumb Rubber* dapat meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan.

### 5.2.11 Tinjauan Umum Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik Campuran SMA 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber*

Secara rinci pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap kinerja perkerasan campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat dilihat pada tabel 5.24 berikut ini.

**Tabel 5.24 Perbandingan Kinerja Perkerasan Campuran SMA 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

No.	Pengujian	Jenis Aspal		Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Kinerja Perkerasan
		Aspal Pen 60/70	Aspal <i>Crumb Rubber</i>	
1	<i>VITM</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>VITM</i> relatif lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional walaupun tidak signifikan.
2	<i>VFWA</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>VFWA</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional walaupun tidak signifikan.
3	<i>VMA</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>VMA</i> relatif lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional walaupun tidak signifikan.
4	<i>Density</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>Density</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional walaupun tidak signifikan.

**Tabel 5.24 Lanjutan Perbandingan Kinerja Perkerasan Campuran SMA 12,5 mm Berbahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber***

5	Stabilitas	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>Density</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai stabilitas.
6	<i>Flow</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>Density</i> relatif lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai <i>flow</i> .
7	<i>MQ</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>Density</i> relatif lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai <i>MQ</i> .
8	<i>IRS</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>IRS</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik <i>anova</i> menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai <i>IRS</i> .
9	<i>ITS</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>ITS</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik <i>anova</i> menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai <i>ITS</i> .
10	<i>TSR</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>Density</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai stabilitas.
11	<i>Cantabro</i>	X	√	Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran SMA 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal <i>Crumb Rubber</i> memiliki nilai <i>Cantabro</i> relatif lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Pada analisis statistik <i>anova</i> menunjukkan perbedaan secara signifikan antara metode pencampuran dan nilai <i>Cantabro</i> .

Keterangan

√ = Kinerja Perkerasan Lebih Baik

X = Kinerja Perkerasan Kurang Baik

## BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan hasil analisis data dari pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan aspal *Crumb Rubber* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm pada pengujian *Marshall*, *IRS*, *ITS*, dan *TSR* secara signifikan menghasilkan nilai yang lebih tinggi dan pada pengujian *Cantabro Loss* menghasilkan nilai yang signifikan lebih rendah daripada penggunaan aspal Pen 60/70 pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm.
2. Karakteristik *Marshall* terhadap penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* secara signifikan memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal tersebut menandakan bahwa penggunaan metode pencampuran dua tahap dapat meningkatkan kemampuan campuran *SMA* 12,5 mm dalam menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk seperti gelombang, alur, dan *bleeding*.
3. Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm berbahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai *Index of Retained Strength (IRS)* signifikan lebih tinggi dari pada penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal tersebut menandakan bahwa pelapisan awal agregat kasar dengan aspal membuat aspal dapat menembus ke *microvoid* agregat kasar sehingga pori-pori campuran lebih terisi oleh aspal membuat *film* atau selimut aspal menjadi lebih tebal dan dapat mengurangi kelembaban agregat, sehingga penggunaan metode pencampuran dua tahap dapat meningkatkan daya tahan campuran beraspal akibat pengaruh air, suhu, dan cuaca.

4. Pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap nilai *Indirect Tensile Strength (ITS)* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* secara signifikan menghasilkan nilai *ITS* yang lebih tinggi daripada penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal tersebut dikarenakan efek dari penggunaan metode pencampuran dua tahap dapat meningkatkan kekakuan campuran, sehingga meningkatkan nilai gaya tarik dari campuran aspal dan mengurangi potensi kegagalan gaya tarik akibat beban lalu lintas yang diterima.
5. Hasil analisis pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)* terhadap penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* menunjukkan adanya perbedaan secara signifikan. Nilai *TSR* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional. Hal tersebut dikarenakan pelapisan awal agregat dengan aspal pada metode pencampuran dua tahap membuat campuran menjadi lebih homogen dan kedap air, sehingga mampu meningkatkan daya lekat aspal dengan agregat dan mampu mengurangi terjadinya keretakan akibat kegagalan gaya tarik terhadap pengaruh cuaca, iklim atau perubahan suhu.
6. Nilai *Cantabro Loss* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap secara signifikan lebih rendah dari penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal tersebut menandakan penggunaan metode pencampuran tersebut mempengaruhi penurunan nilai *Cantabro Loss* yang berarti campuran dengan metode pencampuran dua tahap dapat menghasilkan kemampuan daya dukung dan daya lekat yang lebih baik sehingga campuran menghasilkan gaya adhesi yang lebih baik dan dapat memperlambat pengelupasan aspal dari campuran akibat dari beban lalu lintas.

## 6.2 Saran

Berdasarkan pada hasil penelitian dari pengaruh metode pencampuran dua tahap terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*, maka penulis memberikan saran sebagai berikut.

1. Campuran *SMA* 12,5 mm dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* disarankan menggunakan metode pencampuran secara dua tahap, karena metode pencampuran tersebut mampu meningkatkan stabilitas, durabilitas, ketahanan geser, mengurangi terjadinya pelepasan butir pada campuran beraspal, dan lebih kedap air, namun penggunaan metode pencampuran dua tahap dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 menghasilkan nilai stabilitas tinggi dan nilai kelelahan rendah sehingga campuran *SMA* 12,5 mm tersebut menjadi lebih kaku, fleksibilitas rendah dan berpotensi terjadinya *cracking*.
2. Perlunya pengujian Permeabilitas campuran *SMA* 12,5 mm dengan metode pencampuran dua tahap untuk mengetahui seberapa kedap campuran beton aspal atau tingkat kerapatan suatu perkerasan untuk dapat ditembus oleh air.
3. Perlu penelitian lebih lanjut terhadap nilai *IRS* dan *ITS* dengan durasi perendaman pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm menggunakan metode pencampuran dua tahap.
4. Perlu penelitian lebih lanjut terhadap karakteristik campuran beraspal dengan campuran gradasi lain sebagai pembanding tambahan pada penggunaan metode pencampuran dua tahap.
5. Perlu penelitian lebih lanjut dengan jenis aspal lain sebagai pembanding tambahan pada penggunaan metode pencampuran dua tahap.
6. Penggunaan aspal *Crumb Rubber* direkomendasikan pada campuran aspal lain terutama campuran dengan gradasi terbuka (*open graded*) karena aspal *Crumb Rubber* memiliki karakteristik teknis yang dapat meningkatkan kinerja campuran aspal antara lain: meningkatkan kelekatan, mengurangi terjadinya deformasi, dan meningkatkan ketahanan terhadap retak pada campuran aspal.

7. Pelaksanaan perkerasan jalan dengan menggunakan aspal *Crumb Rubber*, direkomendasikan untuk digunakan pada kondisi lalu lintas berat dan suhu yang ekstrem karena memiliki karakteristik stabilitas dan durabilitas yang tinggi.



## DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Official. 2012. AASHTO M 325-08 Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA). *Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing Part I B Spesification*. Washington, D.C.
- Badan Penelitian dan Pengembangan.” Transportasi Sebagai Pendukung Sasaran Pembangunan Nasional” diakses dari (<http://dephub.go.id/post/transportasi>). Diakses pada 10 Juli 2019 pukul 14.35).
- Badan Pusat Statistik (BPS).”Kondisi Jalan di Indonesia 2019” diakses dari (<https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/820>. Diakses pada 12 Juli 2019 pukul 10.27).
- Brown, Haddock, Mallick and Lynn. 1997. *Development of A Mixture Design Procedure For Stone Matrix Asphalt (SMA)*, National Center for Asphalt Technology (NCAT) Report No. 97-3. Auburn University. Alabama.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2010. *Spesifikasi Umum*. Edisi 2010 (Rev. 3).
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2013. *Spesifikasi Khusus Interim 2013 Seksi 6.3 Aspal Crumb Rubber*. Pusat Litbang Jalan dan Jembatan Badan Penelitian dan Pengembangan. Bandung.
- Djalante, S. 2011. Pengaruh Ketahanan Beton Aspal (AC-BC) Yang Menggunakan Asbuton Butir Tipe 5/20 Terhadap Air Laut Ditinjau Dari Karakteristik Mekanis Dan Durabilitasnya. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Transportasi* (Vol. I).
- Birgisson, B., Hasemi, E., and Kringos, N. 2015. Effect of mixing sequence on the workability and performance of asphalt mixtures. *Journal Road Materials and Pavement Design Vol. 16*. University of Nebraska. Lincoln.

- Birgisson, B., Hasemi, E., Bidewell, N., and Kringos, N. 2013. Evaluation of Environmental Susceptibility of Bituminous Mastic Viscosity as a Function of Material and Biomass Fillers. *Journal of the Transportation Board*. National Academies. Washington, D.C.
- Hidayat, R. 2019. Analisis Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt dengan Abu Ampas Tebu Sebagai Filler Pengganti. *Skripsi*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Subarkah. 2015. *Modul Praktikum Bahan Perkerasan Jalan*. Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Kok, B.K. and Kologlu, N. 2011. Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. *Journal Road Materials and Pavement Design*. 12:4, 721-738. Civil Engineering Department Elazig. Firat University. Turkey.
- Lu, X. dan Yildirim. 2007. Rheological characterization of styrene-butadiene styrene copolymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, Vol.11. 1997. P.23-32.
- Mashuri, dkk., 2011, Studi Pengaruh Penambahan Roadcel-50 Terhadap Karakteristik Campuran Lapis Tipis Beton Aspal (HRS-WC), *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Transportasi*, Universitas Tadulako, Palu.
- Muaya, G.S., 2015, Pengaruh Terendamnya Perkerasan Aspal oleh Air Laut yang Ditinjau terhadap Karakteristik Marshall, *Jurnal Sipil Statik*, Vol. 3 No. 8.
- National Center for Asphalt Technology, 2009, *Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for Airfield Pavement*, Auburn University.

- Purnomo, W., Evaldo, B., dan Suparma, L.B. 2014. Pemanfaatan Crumb Rubber (Tyre Rubber) Sebagai Aditif pada Aspal Modifikasi Polimer. *Tesis*. Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.
- PT Bintang Jaya. 2013. *Latar Belakang Pengembangan Aspal Modifikasi Crumb Rubber*. PT Bintang Djaja. Semarang.
- Ritonga, dan Winsyahputra. 2013. Modifikasi Aspal Dengan Menggunakan Karet Alam Siklit (Cyclic Natural Rubber). *Tesis*. Universitas Sumatera Utara.
- Standar Nasional Indonesia. 2015. *SNI 8129-2015. Tentang Spesifikasi Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Suaryana, N. 2012. Kajian Material Stone Matrix Asphalt Asbuton Berdasarkan Kriteria Deformasi Permanen. *Pusat Litbang Jalan dan Jembatan*. Bandung.
- Suaryana., Subagio., Kosasih., dan Sjahdanulirwan. 2014. Pengembangan Model Korelasi antara Modulus Resilien dengan Modulus Dinamis untuk Campuran *Stone Matrix Asphalt*. *Jurnal Teknik Sipil*. Institut Teknologi Bandung. Vol. 21 No 2. Bandung.
- Sukirman, S.1999. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Penerbit Nova. Bandung.
- Sukirman, S. 2003. *Beton Aspal Campuran Panas*. Yayasan Obor Indonesia. Jakarta.
- Tahir, A. 2011. Kinerja Campuran Split Mastic Asphalt (SMA) yang menggunakan serat selulosa alami dedak padi. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Transportasi Volume 1*, 21-41.
- Rajudin, A.N., dan Suparma, L.B. 2017. Pengaruh Rendaman pada Indirect Tensile Strength Campuran AC-BC dengan Limbah Plastik sebagai Agregat Pengganti. *Disertasi*. Universitas Tarumanegara. Jakarta.

- Tristi, E. 2018. Pengaruh Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Filler Terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA). *Skripsi*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Viman, L., Wendel, M., and Said, S.f. 2015. Long Term Performance Of Flow Mixing Technique. *National Road and Transport Research Institute. VTI 581 95*. Borlange. Sweden.
- Wiranata, A. 2018. Pengaruh Mistikasi Karet Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Karet Spesifikasi Teknis (Crumb Rubber). *Skripsi*. Pekanbaru. Universitas Riau.
- Yusuf, N.A.N. 2017. Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt Dengan Bahan Ikat Aspal Pertamina Pen 60/70 dan Starbit E-55 Akibat Lama Rendaman Air Laut. *Skripsi*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Zachraini, M.R., 2012, Pengaruh Perendaman Terhadap Karakteristik Aspal Porus yang Menggunakan *Liquid* Asbuton Sebagai Bahan Pengikat, *Resume Tugas Akhir*, Universitas Hasanuddin, Makassar.

# LAMPIRAN



### Lampiran 1 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70

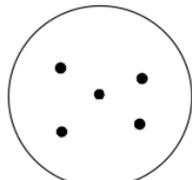
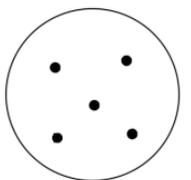
## PEMERIKSAAN PENETRASI ASPAL

Material : Aspal Pertamina Pen 60/70  
Sumber : Pertamina, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji	Mulai	25 °C
		Selesai	130 °C
2.	Didiamkan pada suhu ruang	Mulai	130 °C
		Selesai	25 °C
3.	Diperiksa	Mulai	25 °C
		Selesai	25 °C

### HASIL PENGAMATAN

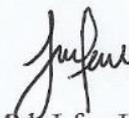
No.	Benda Uji		Sket Pengujian	
			Benda Uji 1	Benda Uji 2
1.	60	65		
2.	61	62		
3.	59	62		
4.	59	61		
5.	61	60		
Rata-rata	61.2	62		
Rerata	60,15			

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal *Crumb Rubber*

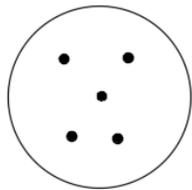
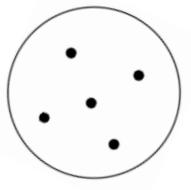
### PEMERIKSAAN PENETRASI ASPAL

Material : Aspal *Crumb Rubber*  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

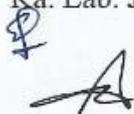
#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji	Mulai	25 °C
		Selesai	198 °C
2.	Didiamkan pada suhu ruang	Mulai	198 °C
		Selesai	25 °C
3.	Diperiksa	Mulai	25 °C
		Selesai	25 °C

#### HASIL PENGAMATAN

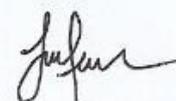
No.	Benda Uji		Sket Pengujian	
			Benda Uji 1	Benda Uji 2
1.	53	56		
2.	53	57		
3.	55	57		
4.	56	56		
5.	61	54		
Rata-rata	55,6	56		
Rerata	55,8			

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

### Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen60/70

## PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPAL

Material : Aspal Pen 60/70  
Sumber : Pertamina, Cilacap  
Tahun Uji : 2019

#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji		
	Mulai	27 °C	09.00
	Selesai	160 °C	09.30
2.	Didiamkan Pada Suhu Ruang		
	Mulai	27 °C	09.30
	Selesai	27 °C	10.30
3.	Diperiksa		
	Mulai	5 °C	10.30
	Selesai	50 °C	10.58

#### HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)		Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji 1	Benda uji 2	Benda Uji 1	Benda Uji 2
1.	5 °C	0	0		
2.	10 °C	145	145		
3.	15 °C	94	94		
4.	20 °C	100	100		
5.	25 °C	113	113		
6.	30 °C	121	121		
7.	35 °C	127	127		
8.	40 °C	134	134		
9.	45 °C	87	87		
10.	50 °C	80	80	48 °C	48,5 °C

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal *Crumb Rubber*

### PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPAL

Material : Aspal *Crumb Rubber*  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji		
	Mulai	27 °C	09.00
	Selesai	198 °C	09.30
2.	Didiamkan Pada Suhu Ruang		
	Mulai	27 °C	09.30
	Selesai	27 °C	10.30
3.	Diperiksa		
	Mulai	5 °C	10.30
	Selesai	50 °C	10.58

#### HASIL PENGAMATAN

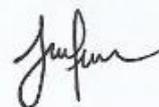
No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)		Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji 1	Benda uji 2	Benda Uji 1	Benda Uji 2
1.	5 °C	0	0		
2.	10 °C	104	104		
3.	15 °C	81	94		
4.	20 °C	99	100		
5.	25 °C	135	113		
6.	30 °C	122	121		
7.	35 °C	125	127		
8.	40 °C	107	134		
9.	45 °C	115	87		
10.	50 °C	119	80	64 °C	64,3C

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

### Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70

#### PEMERIKSAAN DAKTILITAS ASPAL

Material : Aspal Pertamina Pen 60/70

Sumber : Pertamina, Cilacap

Tahun Uji : 2019

#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1.	Persiapan Benda Uji	Aspal Dipanaskan	15 Menit	Suhu Pemanasan $\pm 135^{\circ}\text{C}$
2.	Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan Pada Suhu Ruang	60 Menit	Suhu Ruang $\pm 26^{\circ}\text{C}$
3.	Perendaman Benda Uji	Direndam Dalam Waterbath Pada Suhu $25^{\circ}\text{C}$	60 Menit	Suhu Waterbath $\pm 25^{\circ}\text{C}$
4.	Pemeriksaan	Diuji Daktilitas Pada Suhu $25^{\circ}\text{C}$ , 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	164 cm	Tidak putus
2.	Sampel 2	164 cm	Tidak putus

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya

Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti

Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 6 Pemeriksaan Daktilitas Aspal *Crumb Rubber*

### PEMERIKSAAN DAKTILITAS ASPAL

Material : Aspal *Crumb Rubber*  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1.	Persiapan Benda Uji	Aspal Dipanaskan	15 Menit	Suhu Pemanasan $\pm 135^{\circ}\text{C}$
2.	Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan Pada Suhu Ruang	60 Menit	Suhu Ruang $\pm 26^{\circ}\text{C}$
3.	Perendaman Benda Uji	Direndam Dalam Waterbath Pada Suhu $25^{\circ}\text{C}$	60 Menit	Suhu Waterbath $\pm 25^{\circ}\text{C}$
4.	Pemeriksaan	Diuji Daktilitas Pada Suhu $25^{\circ}\text{C}$ , 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	111 cm	Putus
2.	Sampel 2	106 cm	Putus

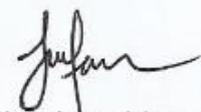
LABORATORIUM  
JALAN RAYA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 7 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70

### PEMERIKSAAN TITIK NYALA & BAKAR ASPAL

Material : Aspal Pertamina Pen 60/70

Sumber : Pertamina, Cilacap

Tahun Uji : 2019

#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji		
	Mulai	25 °C	09.00
	Selesai	145 °C	09.15
2.	Didiamkan Pada Suhu Ruang		
	Mulai	145 °C	09.15
	Selesai	25 °C	09.30
3.	Diperiksa		
	Mulai	30 °C	09.45
	Selesai	340 °C	10.30

#### HASIL PENGAMATAN

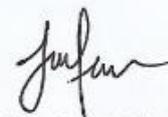
No.	Benda Uji	Titik Nyala	Titik Bakar
1.	Benda Uji 1	327 °C	335 °C

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya




Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 8 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal *Crumb Rubber***

**PEMERIKSAAN TITIK NYALA & BAKAR ASPAL**

Material : Aspal *Crumb Rubber*  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

**PERSIAPAN PEMERIKSAAN**

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji		
	Mulai	25 °C	13.00
	Selesai	198 °C	13.15
2.	Didiamkan Pada Suhu Ruang		
	Mulai	198 °C	13.15
	Selesai	25 °C	13.30
3.	Diperiksa		
	Mulai	30 °C	13.45
	Selesai	340 °C	14.30

**HASIL PENGAMATAN**

No.	Benda Uji	Titik Nyala	Titik Bakar
1.	Benda Uji 1	310 °C	326 °C

LABORATORIUM  
JALAN RAYA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya




Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 9 Pemeriksaan Kelarutan Aspal Pen 60/70 dalam TCE

### PEMERIKSAAN KELARUTAN ASPAL DALAM TCE

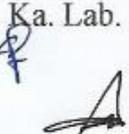
Material : Aspal Pertamina Pen 60/70  
Sumber : Pertamina, Cilacap  
Tahun Uji : 2019

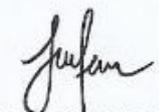
#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan	
			Waktu	Suhu (°C)
1.	Penimbangan	Mulai	10.00	26
2.	Pelarutan	Mulai	10.20	26
3.	Penyaringan	Mulai	10.25	26
		Selesai	10.30	26
4.	Di Oven	Mulai	10.32	110
5.	Penimbangan	Selesai	10.42	26

#### HASIL PEMERIKSAAN

No.	Pemeriksaan	Benda Uji	
		1	2
1.	Beraterlenmayer kosong (gr)	68,87	73,49
2.	Beraterlenmayer kosong + aspal (gr)	69,74	75,47
3.	Berat aspal (gr) (2-1)	0,87	1,27
4.	Berat kertas saring bersih (gr)	0,61	0,62
5.	Berat kertas saring bersih + mineral (gr)	0,62	0,63
6.	Berat mineral (gr) (5-4)	0,01	0,01
7.	Persentase mineral (%) $(6/3 \times 100)$	1,15	0,79
8.	Aspal yang larut (%) $(100-7)$	99,85	99,21
9.	Rata-rata aspal yang larut (%)	99,53	

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 10 Pemeriksaan Kelarutan Aspal *Crumb Rubber* dalam TCE

### PEMERIKSAAN KELARUTAN ASPAL DALAM TCE

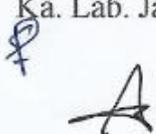
Material : Aspal *Crumb Rubber*  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

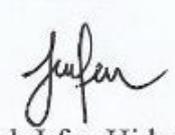
#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan	
			Waktu	Suhu (°C)
1.	Penimbangan	Mulai	10.00	26
2.	Pelarutan	Mulai	10.20	26
3.	Penyaringan	Mulai	10.25	26
		Selesai	10.30	26
4.	Di Oven	Mulai	10.32	110
5.	Penimbangan	Selesai	10.42	26

#### HASIL PEMERIKSAAN

No.	Pemeriksaan	Benda Uji	
		1	2
1.	Beraterlenmayer kosong (gr)	68,87	74,22
2.	Beraterlenmayer kosong + aspal (gr)	70,02	75,47
3.	Berat aspal (gr) (2-1)	1,15	1,25
4.	Berat kertas saring bersih (gr)	0,6	0,58
5.	Berat kertas saring bersih + mineral (gr)	0,61	0,59
6.	Berat mineral (gr) (5-4)	0,01	0,01
7.	Persentase mineral (%) $(6/3 \cdot 100)$	0,869	0,80
8.	Aspal yang larut (%) $(100-7)$	99,13	99,20
9.	Rata-rata aspal yang larut (%)	99,17	

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

### Lampiran 11 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70

#### PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

Material : Aspal Pertamina Pen 60/70

Sumber : Pertamina, Cilacap

Tahun Uji : 2019

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1.	Berat piknometer kosong (gr)	20,57	20,68
2.	Berat piknometer + aquadest (gr)	43,53	43,65
3.	Berat aquadest (gr) (2-1)	22,96	22,97
4.	Berat piknometer + aspal (gr)	22,81	22,38
5.	Berat aspal (gr) (4-1)	2,24	1,70
6.	Berat piknometer + aspal + aquadest (gr)	43,55	43,71
7.	Berat aquadest (gr) (6-4)	20,74	21,33
8.	Volume aspal (gr) (3-7)	2,22	1,64
9.	Berat jenis aspal = Berat / Vol (5/8)	1,009	1,037
10.	Rata-rata BJ Aspal	1,023	

Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya

Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti

Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal *Crumb Rubber***

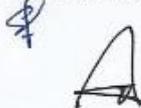
**PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL**

Material : Aspal *Crumb Rubber*  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1.	Berat piknometer kosong (gr)	20,99	20,33
2.	Berat piknometer + aquadest (gr)	44,37	42,48
3.	Berat aquadest (gr) (2-1)	23,38	22,15
4.	Berat piknometer + aspal (gr)	21,87	21,10
5.	Berat aspal (gr) (4-1)	0,88	0,77
6.	Berat piknometer + aspal + aquadest (gr)	44,40	42,50
7.	Berat aquadest (gr) (6-4)	22,53	21,40
8.	Volume aspal (gr) (3-7)	0,85	0,75
9.	Berat jenis aspal = Berat / Vol (5/8)	1,035	1,026
10.	Rata-rata BJ Aspal	1,031	

Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar**

**PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR**

Material : Agregat Kasar  
Sumber : Clereng, Kulonprogo  
Tahunl Uji : 2020

No	Keterangan	Benda Uji (gr)		
		1	2	Rata-rata
1	Berat Benda Uji Dalam Keadaan Basah Jenuh (BJ)	1600,0 4	1619,2 7	1609,66
2	Berat Benda Uji Dalam Air (BA)	1001,1 4	1002,4 6	1001,80
4	Berat Benda Uji Kering Oven (BK)	1574,4 6	1591,4 2	1582,94
5	Berat Jenis ( <i>Bulk</i> ) = $\frac{BK}{BJ-BA}$	2,629	2,580	2,605
6	Berat Jenis ( <i>SSD</i> ) = $\frac{BJ}{BJ-BA}$	2,672	2,625	2,648
7	Berat Jenis (Semu) = $\frac{BK}{BK-BA}$	2,746	2,702	2,724
8	Penyerapan Air = $\frac{BK}{BK-BA} \times 100\%$	1,625	1,750	1,687
9	Berat Cawan	128,09	257,18	
10	Berat Jenis Efektif = (BJ <i>Bulk</i> + BJ Semu) / 2	2,6875	2,6410	
11	Berat Jenis Efektif Rata-rata	2,6428		
12	Penyerapan Rata-rata	1,687		

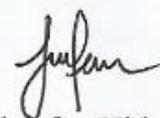
Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 14 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Oleh Aspal Pen 60/70

### PEMERIKSAAN KELEKATAN AGREGAT ASPAL

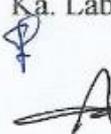
Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 dan Agregat ukuran (3/8") Clereng  
Sumber : Pertamina, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

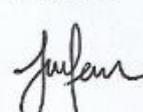
#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji		
	Mulai	25 °C	10.00
	Selesai	150 °C	10.20
2.	Didiamkan Pada Suhu Ruang		
	Mulai	150 °C	10.20
	Selesai	25 °C	13.30
3.	Diperiksa		
	Mulai	25 °C	13.30
	Selesai	25 °C	15.00

#### HASIL PEMERIKSAAN

No.	Benda Uji	% Terselimuti Aspal	Keterangan
1.	Benda Uji 1	95%	Memenuhi
2.	Benda Uji 2	96%	Memenuhi
3.	Rata-Rata	95,5%	Memenuhi

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 15 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Oleh Aspal *Crumb Rubber*

### PEMERIKSAAN KELEKATAN AGREGAT ASPAL

Material : Aspal *Crumb Rubber* dan Agregat ukuran (3/8") Clereng  
Sumber : PT Bintang Djaja, Cilacap  
Tahun Uji : 2020

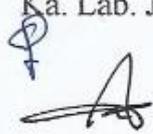
#### PERSIAPAN PEMERIKSAAN

No.	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. Waktu
1.	Pemanasan Benda Uji		
	Mulai	26 °C	10.00
	Selesai	198 °C	10.20
2.	Didiamkan Pada Suhu Ruang		
	Mulai	198 °C	10.20
	Selesai	26 °C	13.30
3.	Diperiksa		
	Mulai	26 °C	13.30
	Selesai	26 °C	15.00

#### HASIL PEMERIKSAAN

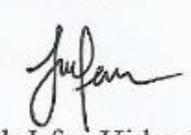
No.	Benda Uji	% Terselimuti Aspal	Keterangan
1.	Benda Uji 1	97%	Memenuhi
2.	Benda Uji 2	97%	Memenuhi
3.	Rata-Rata	97%	Memenuhi

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 16 Pemeriksaan Keausan Agregat (*Abrasi Test*)**

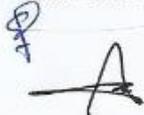
**PEMERIKSAAN KEUASAN AGREGAT (*ABRASI TEST*)**

Material : Agregat Kasar  
Sumber : Clereng, Kulonprogo  
Tahun Uji : 2019

No.	Jenis Gradasi		Benda Uji (gram)	
	Saringan		1	2
	Lolos	Tertahan		
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	
7.	12.5 mm (0.5")	09.5 mm (3/8")	2500	
8.	09.5 mm (3/8")	06.3 mm (1/4")		
9.	06.3 mm (1/4")	04.75 mm (No.4)		
10.	04.75 mm (No.4)	02.36 mm (No.8)		
11.	Jumlah Benda Uji (A)		5000	4402,19
12.	Jumlah Tertahan Di Sieve 12 (B)		4402,19	3465,19
13.	Keausan = $\frac{A-B}{A} \times 100\%$		11,96%	21,28%
14.	Rata-rata Keausan (%)		16,62%	

Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

## Lampiran 17 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

### PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT HALUS

Material : Agregat Halus  
Sumber : Clereng, Kulonprogo  
Tahun Uji : 2019

No.	Keterangan	Benda Uji (gr)		
		1	2	Rata-rata
1	Berat Benda Uji Dalam Keadaan Basah Jenuh (BJ)	500	500	500
2	Berat <i>Piknometer</i> + Air (B)	690,4	658,71	674,555
3	Berat <i>Piknometer</i> + Air + Benda Uji (BT)	992,3	969,21	980,755
4	Berat Benda Uji Kering Oven (BK)	489,21	488,83	489,02
5	Berat Jenis ( <i>Bulk</i> ) = $\frac{BK}{(B+500)-BT}$	2,47	2,58	2,52
6	Berat Jenis ( <i>SSD</i> ) = $\frac{500}{(B+500)-BT}$	2,52	2,64	2,58
7	Berat Jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B+BK)-BT}$	2,61	2,74	2,68
8	Penyerapan Air = $\frac{(500-BK)}{BK} \times 100\%$	2,21	2,29	2,25
9	Berat Jenis Efektif = (BJ <i>Bulk</i> + BJ Semu) / 2	2,54	2,66	
10	Berat Jenis Efektif Rata-rata	2,605		

Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya




Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

### Lampiran 18 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler* Clereng

#### PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER* CLERENG

Material : Filler, Clereng  
Sumber : Clereng, Kulonprogo  
Tahun Uji : 2019

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1.	Berat piknometer kosong (gr)	12,04	11,84
2.	Berat piknometer + aquadest (gr)	29,24	29,22
3.	Berat aquadest (gr) (2-1)	17,2	17,38
4.	Berat piknometer + <i>Filler</i> (gr)	13,09	13,24
5.	Berat <i>Filler</i> (gr) (4-1)	1,05	1,4
6.	Berat piknometer + <i>Filler</i> + aquadest (gr)	29,88	30,07
7.	Berat aquadest (gr) (6-4)	16,79	16,83
8.	Volume <i>Filler</i> (gr) (3-7)	0,41	0,55
9.	Berat jenis <i>Filler</i> = Berat / Vol (5/8)	2,561	2,545
10.	Rata-rata BJ <i>Filler</i>	2,553	

Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 19 Pemeriksaan Sand Equivalent**

**PEMERIKSAAN SAND EQUIVALENT**

Material : Agregat Halus  
Sumber : Clereng, Kulonprogo  
Tahun Uji : 2019

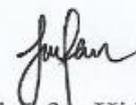
No.	Keterangan	Benda Uji (gr)		
			1	2
1	Persiapan dan Perendaman Benda Uji Dalam Larutan CaCl <sub>2</sub> selama (± 10 menit)	Mulai	12.22	12.22
		Selesai	12.32	12.32
2	Waktu Pengendapan (Benda Uji setelah di gojok sebanyak 90x, dan ditambah larutan CaCl <sub>2</sub> )	Mulai	12.32	12.32
		Selesai	12.35	12.35
3	Clay Reading (Pembacaan Lumpur) Inchi		3,9	3,6
4	Sand Reading (Pembacaan Pasir)		3,6	3,3
5	$Sand\ Equivalent = \frac{Sand\ reading}{Clay\ reading} \times 100$		92,3076	91,6667
6	Rata-rata Sand Equivalent (%)		91,9871	

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya




Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320



**Lampiran 20 Tabel Pengujian Marshall Test dalam Mencari KAO Aspal Pen 60/70**

**TABEL PENGUJIAN MARSHALL TEST DALAM Mencari KADAR ASPAL OPTIMUM**

Tanggal Pengujian : 10 Februari 2020  
Tipe Campuran : Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
5.5A	69,87	5,82	5,5	1165,85	1171,02	663,86	507,2	2,299	2,431	12,359	82,1977	5,443	17,80	69,42	5,44	61	903,05	0,861	777,19	3,50	222,05
5.5B	69,60	5,82	5,5	1165,78	1171,52	662,25	509,27	2,289	2,431	12,307	81,8522	5,841	18,15	67,82	5,84	58	858,64	0,866	743,26	3,40	218,61
5.5C	68,43	5,82	5,5	1165,11	1174,34	659,13	515,21	2,261	2,431	12,158	80,862	6,980	19,14	63,53	6,98	65	962,27	0,888	854,01	3,20	266,88
								<b>2,283</b>					<b>18,36</b>	<b>66,92</b>	<b>6,21</b>				<b>815,601</b>	<b>3,37</b>	<b>235,85</b>
6A	69,47	6,38	6	1164,76	1173,52	664,79	508,73	2,290	2,414	13,428	81,4342	5,137	18,57	72,33	5,14	70	1036,29	0,868	899,63	4,00	224,91
6B	69,13	6,38	6	1167,29	1180,64	668,17	512,47	2,278	2,414	13,359	81,0155	5,625	18,98	70,37	5,63	64	947,46	0,874	828,44	3,50	236,70
6C	69,33	6,38	6	1161,88	1179,66	669,20	510,46	2,276	2,414	13,350	80,9576	5,693	19,04	70,11	5,69	62	917,86	0,871	799,11	3,90	204,90
								<b>2,281</b>					<b>18,86</b>	<b>70,93</b>	<b>5,49</b>				<b>842,392</b>	<b>3,80</b>	<b>222,17</b>
6.5A	70,37	6,95	6,5	1174,08	1180,08	667,55	512,53	2,291	2,396	14,555	81,0438	4,401	18,96	76,78	4,40	68	1006,68	0,851	856,35	4,00	214,09
6.5B	70,33	6,95	6,5	1170,96	1184,37	663,09	521,28	2,246	2,396	14,273	79,4717	6,256	20,53	69,53	6,26	71	1051,09	0,851	894,83	3,70	241,85
6.5C	70,20	6,95	6,5	1182,34	1188,34	671,88	516,46	2,289	2,396	14,546	80,993	4,461	19,01	76,53	4,46	73	1080,70	0,854	922,92	4,10	225,10
								<b>2,275</b>					<b>19,50</b>	<b>74,28</b>	<b>5,04</b>				<b>891,366</b>	<b>3,93</b>	<b>227,01</b>
7A	69,70	7,53	7	1187,87	1192,60	672,87	519,73	2,286	2,379	15,639	80,4274	3,933	19,57	79,90	3,93	77	1139,92	0,864	984,60	4,50	218,80
7B	71,73	7,53	7	1182,62	1192,33	670,14	522,19	2,265	2,379	15,497	79,6947	4,809	20,31	76,32	4,81	71	1051,09	0,826	868,03	3,90	222,57
7C	69,80	7,53	7	1185,34	1190,30	667,16	523,14	2,266	2,379	15,504	79,733	4,763	20,27	76,50	4,76	69	1021,48	0,862	880,39	4,40	200,09
								<b>2,272</b>					<b>20,05</b>	<b>77,57</b>	<b>4,50</b>				<b>911,008</b>	<b>4,27</b>	<b>213,82</b>
7.5A	69,30	8,11	7,5	1173,26	1189,83	671,05	518,78	2,262	2,362	16,580	79,1558	4,264	20,84	79,54	4,26	57	843,83	0,871	735,19	5,00	147,04
7.5B	69,20	8,11	7,5	1170,94	1186,03	669,11	516,92	2,265	2,362	16,607	79,2835	4,109	20,72	80,16	4,11	48	710,60	0,873	620,44	4,70	132,01
7.5C	69,93	8,11	7,5	1179,95	1193,22	676,55	516,67	2,284	2,362	16,743	79,9323	3,325	20,07	83,43	3,32	62	917,86	0,859	788,74	4,50	175,28
								<b>2,270</b>					<b>20,54</b>	<b>81,05</b>	<b>3,90</b>				<b>714,792</b>	<b>4,73</b>	<b>151,44</b>

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320



Lampiran 21 Tabel Pengujian *Marshall Test* dalam Mencari KAO Aspal Crumb Rubber

TABEL PENGUJIAN MARSHALL TEST DALAM Mencari KADAR ASPAL OPTIMUM

Tanggal Pengujian : 10 Februari 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA) 12,5 mm*

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

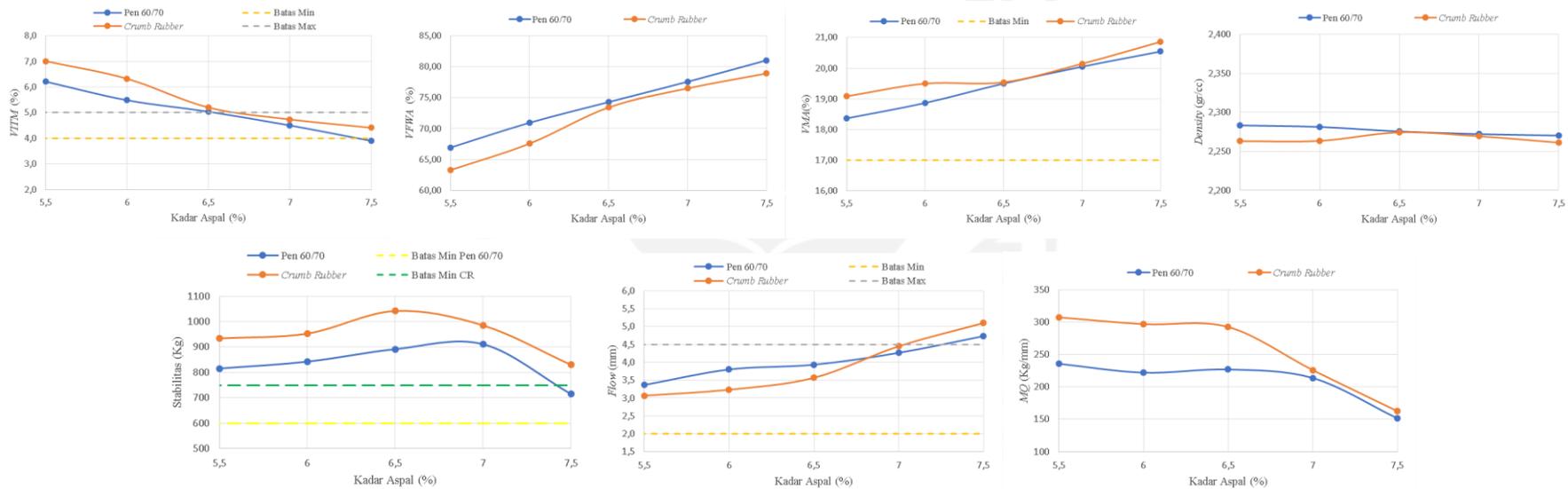
Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
5.5A	71,13	5,82	5,5	1180,53	1196,55	672,50	524,05	2,253	2,434	12,017	80,5501	7,433	19,45	61,79	7,43	78	1154,72	0,833	962,27	2,80	343,67
5.5B	71,60	5,82	5,5	1185,32	1198,07	675,31	522,76	2,267	2,434	12,096	81,0765	6,828	18,92	63,92	6,83	71	1051,09	0,828	869,78	3,40	255,82
5.5C	70,93	5,82	5,5	1184,85	1196,55	674,33	522,22	2,269	2,434	12,104	81,1282	6,768	18,87	64,14	6,77	78	1154,72	0,839	969,20	3,00	323,07
								<b>2,263</b>					<b>19,08</b>	<b>63,28</b>	<b>7,01</b>				<b>933,75</b>	<b>3,07</b>	<b>307,52</b>
6A	71,17	6,38	6	1179,97	1193,52	672,45	521,07	2,265	2,416	13,179	80,5439	6,278	19,46	67,73	6,28	83	1228,74	0,833	1023,44	3,00	341,15
6B	70,97	6,38	6	1175,25	1190,05	671,05	519	2,264	2,416	13,178	80,5417	6,280	19,46	67,73	6,28	72	1065,90	0,839	893,93	3,10	288,37
6C	71,73	6,38	6	1178,94	1195,72	674,34	521,38	2,261	2,416	13,159	80,4258	6,415	19,57	67,23	6,42	77	1139,92	0,826	941,38	3,60	261,49
								<b>2,263</b>					<b>19,496</b>	<b>67,562</b>	<b>6,324</b>				<b>952,918</b>	<b>3,233</b>	<b>297,002</b>
6.5A	70,20	6,95	6,5	1171,94	1185,69	673,02	512,67	2,286	2,399	14,412	80,874	4,714	19,13	75,35	4,71	86	1273,15	0,854	1087,27	3,60	302,02
6.5B	71,70	6,95	6,5	1170,23	1189,07	674,76	514,31	2,275	2,399	14,345	80,4985	5,156	19,50	73,56	5,16	81	1199,13	0,826	990,78	3,70	267,78
6.5C	69,77	6,95	6,5	1164,65	1184,55	669,55	515	2,261	2,399	14,257	80,0073	5,735	19,99	71,31	5,74	82	1213,94	0,863	1047,22	3,40	308,01
								<b>2,274</b>					<b>19,540</b>	<b>73,408</b>	<b>5,202</b>				<b>1041,761</b>	<b>3,567</b>	<b>292,602</b>
7A	70,43	7,53	7	1169,63	1190,30	674,17	516,13	2,266	2,382	15,386	79,7448	4,869	20,26	75,96	4,87	73	1080,70	0,849	917,88	4,50	203,97
7B	69,97	7,53	7	1170,63	1188,43	670,81	517,62	2,262	2,382	15,355	79,5832	5,062	20,42	75,21	5,06	78	1154,72	0,859	991,52	4,10	241,83
7C	70,87	7,53	7	1169,82	1185,96	672,92	513,04	2,280	2,382	15,481	80,2381	4,281	19,76	78,34	4,28	84	1243,55	0,841	1045,41	4,50	232,31
								<b>2,269</b>					<b>20,145</b>	<b>76,503</b>	<b>4,737</b>				<b>984,935</b>	<b>4,367</b>	<b>226,040</b>
7.5A	70,77	8,11	7,5	1175,96	1189,32	672,75	516,57	2,276	2,365	16,560	79,6774	3,762	20,32	81,49	3,76	65	962,27	0,843	810,87	4,90	165,48
7.5B	70,57	8,11	7,5	1168,15	1188,19	672,81	515,38	2,267	2,365	16,488	79,331	4,181	20,67	79,77	4,18	57	843,83	0,847	714,45	5,10	140,09
7.5C	70,57	8,11	7,5	1169,65	1191,27	669,18	522,09	2,240	2,365	16,297	78,4119	5,291	21,59	75,49	5,29	77	1139,92	0,847	965,13	5,30	182,10
								<b>2,261</b>					<b>20,860</b>	<b>78,917</b>	<b>4,411</b>				<b>830,149</b>	<b>5,100</b>	<b>162,557</b>

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 22 Grafik Hasil Pengujian *Marshall Test* dalam Mencari KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber*

HASIL PENGUJIAN *MARSHALL TEST* DALAM MENENTUKAN KADAR ASPAL OPTIMUM

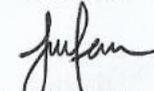


Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

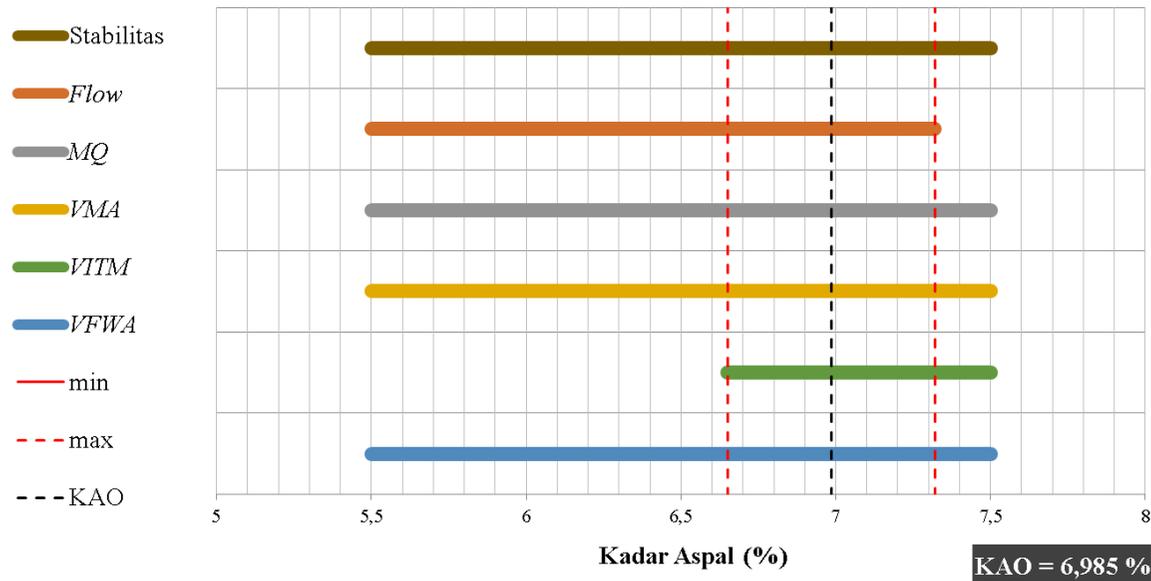
Peneliti

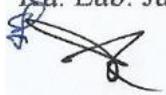


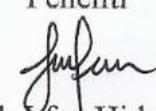
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 23 Grafik Hasil Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal Pen 60/70

GRAFIK HASIL KADAR ASPAL OPTIMUM (KAO) ASPAL PEN 60/70

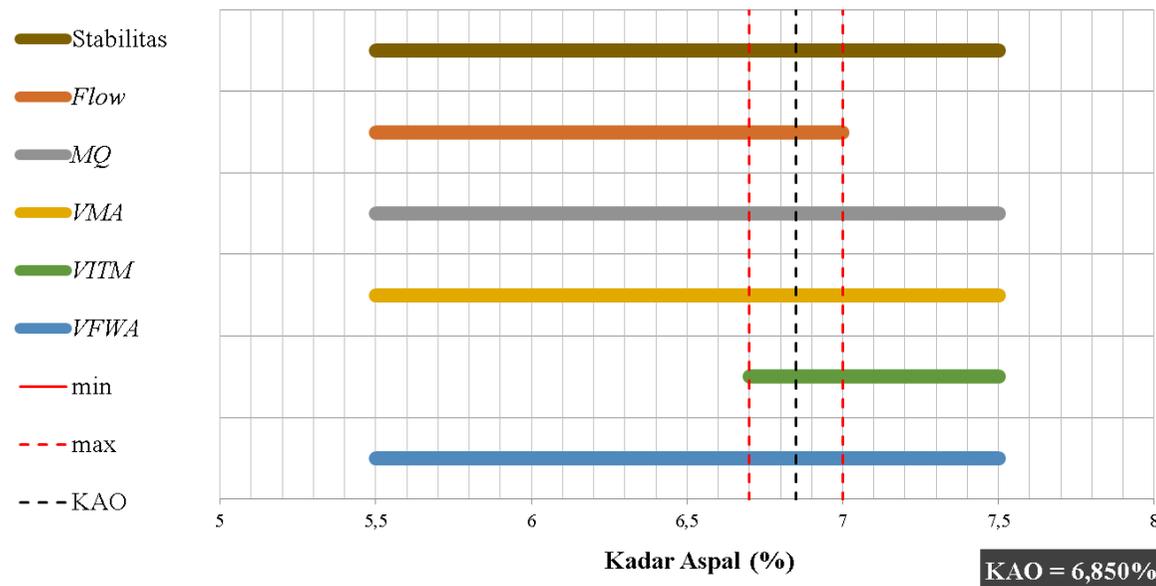


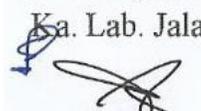
Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

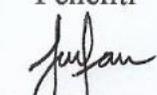
Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 24 Grafik Hasil Kadar Aspal Optimum (KAO) Aspal *Crumb Rubber*

GRAFIK HASIL KADAR ASPAL OPTIMUM (KAO) ASPAL *CRUMB RUBBER*



Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Ifan Hidayat  
14511320

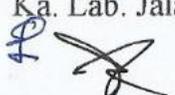
Lampiran 25 Tabel Pengujian *Marshall Test* pada KAO Aspal Pen 60/70 dengan Dua Metode Pencampuran

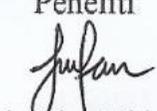
TABEL PENGUJIAN MARSHALL TEST PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

Tanggal Pengujian : 26 Februari 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
Metode Konvensional 1	69,23	7,51	6,985	1161,41	1174,43	666,07	508,36	2,285	2,380	15,599	80,4076	3,993	19,59	79,62	3,99	68	1006,68	0,910	916,08	4,10	223,43
Metode Konvensional 2	70,40	7,51	6,985	1163,73	1178,17	661,43	516,74	2,252	2,380	15,377	79,2616	5,361	20,74	74,15	5,36	65	962,27	0,850	817,93	3,70	245,85
Metode Konvensional 3	67,67	7,51	6,985	1166,22	1172,19	663,80	508,39	2,294	2,380	15,663	80,7359	3,601	19,26	81,31	3,60	70	1036,29	0,906	938,70	4,50	208,60
								<b>2,277</b>					<b>19,86</b>	<b>78,36</b>	<b>4,32</b>				<b>867,00</b>	<b>4,10</b>	<b>234,64</b>
Metode Dua Tahap 1	69,40	7,51	6,985	1163,73	1176,67	664,59	512,08	2,273	2,380	15,517	79,9829	4,500	20,02	77,52	4,50	69	1021,48	0,869	888,05	3,90	227,71
Metode Dua Tahap 2	70,30	7,51	6,985	1176,14	1182,39	672,85	509,54	2,308	2,380	15,761	81,2388	3,001	18,76	84,01	3,00	68	1006,68	0,852	857,69	4,20	204,21
Metode Dua Tahap 3	69,47	7,51	6,985	1165,58	1177,01	661,89	515,12	2,263	2,380	15,450	79,6373	4,913	20,36	75,87	4,91	72	1065,90	0,868	925,33	3,50	264,38
								<b>2,281</b>					<b>19,71</b>	<b>79,13</b>	<b>4,14</b>				<b>890,36</b>	<b>3,87</b>	<b>232,100</b>

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 26 Tabel Pengujian *Marshall Test* pada KAO *Aspal Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

TABEL PENGUJIAN MARSHALL TEST PADA KAO ASPAL CRUMB RUBBER DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

Tanggal Pengujian : 6 Maret 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
Metode Konvensional 1	70,24	7,35	6,85	1160,35	1178,76	667,21	511,55	2,268	2,387	15,071	79,9491	4,980	20,05	75,16	4,98	81	1199,13	0,853	1023,18	3,50	292,34
Metode Konvensional 2	70,67	7,35	6,85	1164,61	1180,10	668,26	511,84	2,275	2,387	15,117	80,1972	4,685	19,80	76,34	4,69	78	1154,72	0,845	975,35	3,10	314,63
Metode Konvensional 3	72,53	7,35	6,85	1169,17	1183,48	671,01	512,47	2,281	2,387	15,158	80,4122	4,430	19,59	77,38	4,43	71	1051,09	0,816	857,52	4,30	199,42
								2,275					19,81	76,30	4,70				952,02	3,63	303,48
Metode Dua Tahap 1	72,43	7,35	6,85	1178,36	1185,13	671,69	513,44	2,295	2,387	15,248	80,8912	3,861	19,11	79,80	3,86	87	1287,96	0,817	1052,37	3,00	350,79
Metode Dua Tahap 2	70,50	7,35	6,85	1169,85	1186,69	670,81	515,88	2,268	2,387	15,067	79,9271	5,006	20,07	75,06	5,01	82	1213,94	0,848	1029,42	3,40	302,77
Metode Dua Tahap 3	71,17	7,35	6,85	1168,82	1182,18	669,96	512,22	2,282	2,387	15,161	80,4274	4,412	19,57	77,46	4,41	75	1110,31	0,835	926,74	4,20	220,65
								2,280					19,58	77,44	4,43				1002,84	3,53	291,404

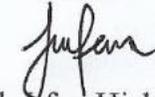
Mengetahui,

Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti

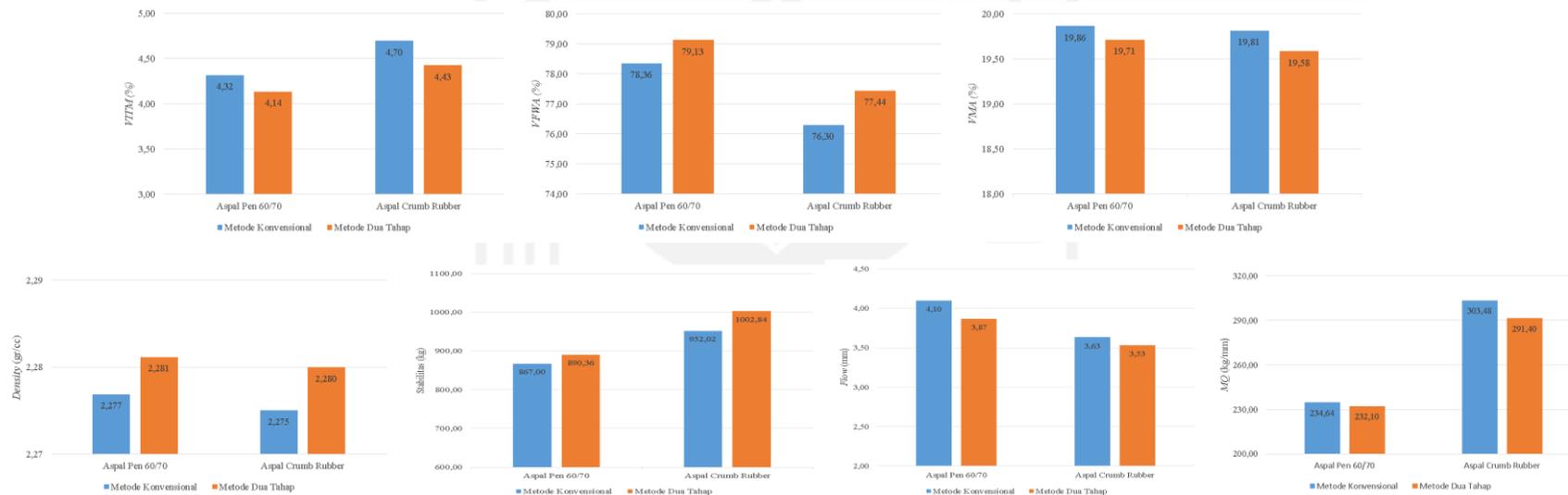


Muh Irfan Hidayat

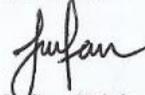
14511320

Lampiran 27 Grafik Hasil Pengujian *Marshall Test* pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL PENGUJIAN *MARSHALL TEST* PADA KAO ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN



Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M. T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 28 Tabel Pengujian *Immersion Test* pada KAO Aspal Pen 60/70 dengan Dua Metode Pencampuran

TABEL PENGUJIAN *IMMERSION TEST* PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

Tanggal Pengujian : 4 Maret 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
Metode Konvensional 1	70,77	7,51	6,985	1177,72	1187,18	671,01	516,17	2,282	2,380	15,579	80,2959	4,125	19,70	79,06	4,13	68	1006,68	0,795	800,31	4,20	190,55
Metode Konvensional 2	68,73	7,51	6,985	1178,97	1187,64	667,17	520,47	2,265	2,380	15,467	79,7171	4,816	20,28	76,25	4,82	59	873,44	0,883	771,54	5,50	140,28
Metode Konvensional 3	71,63	7,51	6,985	1176,86	1186,10	669,35	516,75	2,277	2,380	15,550	80,1472	4,303	19,85	78,33	4,30	66	977,07	0,807	788,17	4,80	164,20
								<b>2,275</b>					<b>19,95</b>	<b>77,88</b>	<b>4,21</b>				<b>786,67</b>	<b>4,83</b>	<b>165,011</b>
Metode Dua Tahap 1	68,80	7,51	6,985	1165,72	1176,39	667,53	508,86	2,291	2,380	15,642	80,6195	3,739	19,38	80,71	3,74	65	962,27	0,875	841,98	4,40	191,36
Metode Dua Tahap 2	68,40	7,51	6,985	1178,86	1188,82	664,73	524,09	2,249	2,380	15,358	79,159	5,483	20,84	73,69	5,48	61	903,05	0,892	805,52	5,80	138,88
Metode Dua Tahap 3	67,80	7,51	6,985	1167,32	1176,71	666,74	509,97	2,289	2,380	15,629	80,5544	3,816	19,45	80,37	3,82	60	888,25	0,897	796,65	4,60	173,18
								<b>2,276</b>					<b>19,89</b>	<b>78,26</b>	<b>4,35</b>				<b>814,72</b>	<b>4,93</b>	<b>167,809</b>

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti



Muh Irfan Hidayat  
14511320

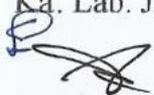
Lampiran 29 Tabel Pengujian *Immersion Test* pada KAO Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

TABEL PENGUJIAN *IMMERSION TEST* PADA KAO ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

Tanggal Pengujian : 11 Maret 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

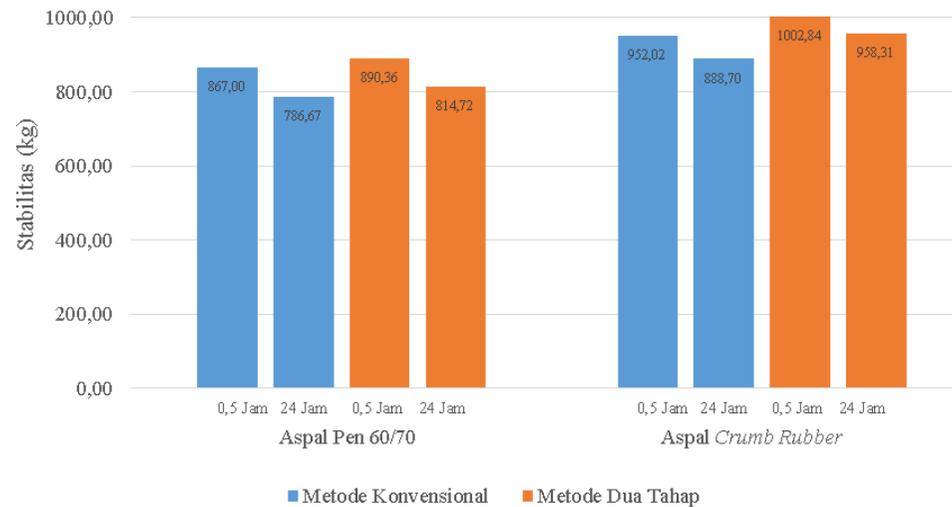
Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
Metode Konvensional 1	70,93	7,35	6,85	1175,62	1188,61	666,41	522,20	2,251	2,387	14,958	79,3422	5,700	20,66	72,41	5,70	69	1021,48	0,853	871,60	5,30	164,45
Metode Konvensional 2	72,17	7,35	6,85	1169,99	1181,25	670,43	510,82	2,290	2,387	15,218	80,7213	4,061	19,28	78,93	4,06	73	1080,70	0,845	912,83	4,50	202,85
Metode Konvensional 3	72,57	7,35	6,85	1178,10	1184,31	672,28	512,03	2,301	2,387	15,287	81,0888	3,624	18,91	80,83	3,62	73	1080,70	0,816	881,67	4,30	205,04
								<b>2,281</b>					<b>19,62</b>	<b>77,39</b>	<b>4,46</b>				<b>888,70</b>	<b>4,70</b>	<b>190,78</b>
Metode Dua Tahap 1	71,27	7,35	6,85	1172,82	1183,91	668,83	515,08	2,277	2,387	15,128	80,2474	4,624	19,75	76,59	4,62	75	1110,31	0,817	907,22	5,00	181,44
Metode Dua Tahap 2	71,20	7,35	6,85	1172,99	1183,89	669,37	514,52	2,280	2,387	15,147	80,3463	4,507	19,65	77,07	4,51	78	1154,72	0,848	979,20	4,20	233,14
Metode Dua Tahap 3	70,23	7,35	6,85	1182,50	1192,50	675,94	516,56	2,289	2,387	15,209	80,6779	4,113	19,32	78,71	4,11	80	1184,33	0,835	988,52	4,80	205,94
								<b>2,282</b>					<b>19,576</b>	<b>77,458</b>	<b>4,415</b>				<b>958,313</b>	<b>4,667</b>	<b>206,843</b>

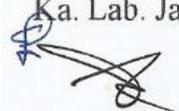
Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

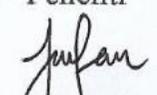
Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 30 Grafik Hasil Pengujian *Immersion Test* pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran**

**GRAFIK HASIL PENGUJIAN *IMMERSION TEST* PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN**

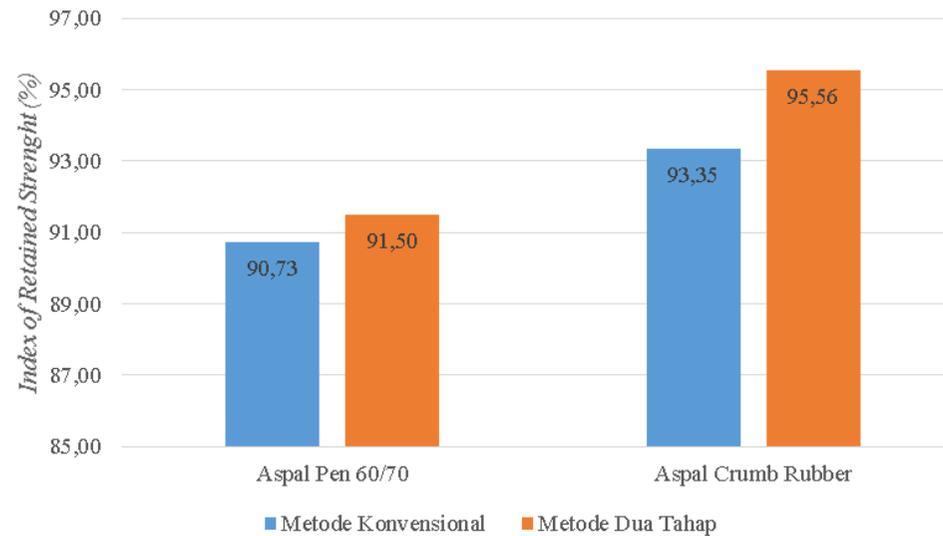


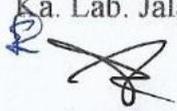
Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Lufan Hidayat  
14511320

**Lampiran 31 Grafik Hasil Pengujian *Immersion Test* pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran**

**GRAFIK HASIL *INDEX OF RETAINED STRENGTH (IRS)* PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN**



Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 32 Tabel Pengujian ITS 0,5 Jam pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

TABEL PENGUJIAN ITS 0,5 JAM PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

Tanggal Pengujian : 13 Maret 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

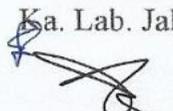
Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

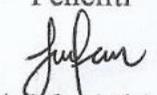
Aspal pen 60/70 Metode Konvensional									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm2)
Metode Konvensional 1	70	69,6	69,9	69,83	0,86	32	548,036112	0,159	12,44
Metode Konvensional 2	69,4	70,5	69,7	69,87	0,86	32	547,638408	0,159	12,43
Metode Konvensional 3	72,5	73,40	72,1	72,67	0,81	34	550,455478	0,159	12,01
Rata - rata									12,29

Aspal pen 60/70 Metode Dua Tahap									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm2)
Metode Dua Tahap 1	71,3	70,7	71,2	71,07	0,83	38	630,327698	0,159	14,06
Metode Dua Tahap 2	68,3	68,5	67,8	68,20	0,89	39	692,154099	0,159	16,09
Metode Dua Tahap 3	69,9	69,60	69,3	69,60	0,87	37	636,8856713	0,159	14,51
Rata - rata									14,88

Aspal <i>Crumb Rubber</i> Metode Konvensional									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm2)
Metode Konvensional 1	71,2	71,4	71,1	71,23	0,83	40	662,84	0,159	14,75
Metode Konvensional 2	69,5	69,4	69	69,30	0,87	45	779,6241225	0,159	17,83
Metode Konvensional 3	70,9	71	69,8	70,57	0,85	42	707,117712	0,159	15,88
Rata - rata									16,16

Aspal <i>Crumb Rubber</i> Metode Dua Tahap									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm2)
Metode Dua Tahap 1	70,9	71,1	71	71,00	0,84	45	749,870892	0,159	16,74
Metode Dua Tahap 2	71,1	70,5	70,7	70,77	0,84	46	770,8033792	0,159	17,27
Metode Dua Tahap 3	71,1	71,6	71	71,23	0,83	49	811,979	0,159	18,07
Rata - rata									17,36

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 33 Tabel Pengujian ITS 24 Jam pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

TABEL PENGUJIAN ITS 24 JAM PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

Tanggal Pengujian : 13 Maret 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

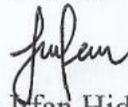
Aspal pen 60/70 Metode Konvensional									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm <sup>2</sup> )
Metode Konvensional 1	68	69,4	68,1	68,50	0,89	24	422,958204	0,159	9,79
Metode Konvensional 2	71,2	71,7	70,8	71,23	0,83	26	430,846	0,159	9,59
Metode Konvensional 3	71,9	71,20	71,4	71,50	0,83	28	461,436066	0,159	10,23
Rata - rata									9,87

Aspal pen 60/70 Metode Dua Tahap									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm <sup>2</sup> )
Metode Dua Tahap 1	73,7	74	73,3	73,67	0,82	33	536,999826	0,159	11,56
Metode Dua Tahap 2	66,6	67,2	67	66,93	0,92	29	532,939931	0,159	12,62
Metode Dua Tahap 3	68,5	69,80	68,8	69,03	0,88	30	522,732195	0,159	12,00
Rata - rata									12,06

Aspal <i>Crumb Rubber</i> Metode Konvensional									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm <sup>2</sup> )
Metode Konvensional 1	72,5	72,4	72,9	72,60	0,82	37	599,638206	0,159	13,09
Metode Konvensional 2	69,3	69,8	70,3	69,80	0,86	39	668,4037133	0,159	15,18
Metode Konvensional 3	72,3	71,9	71,8	72,00	0,82	35	572,445195	0,159	12,60
Rata - rata									13,63

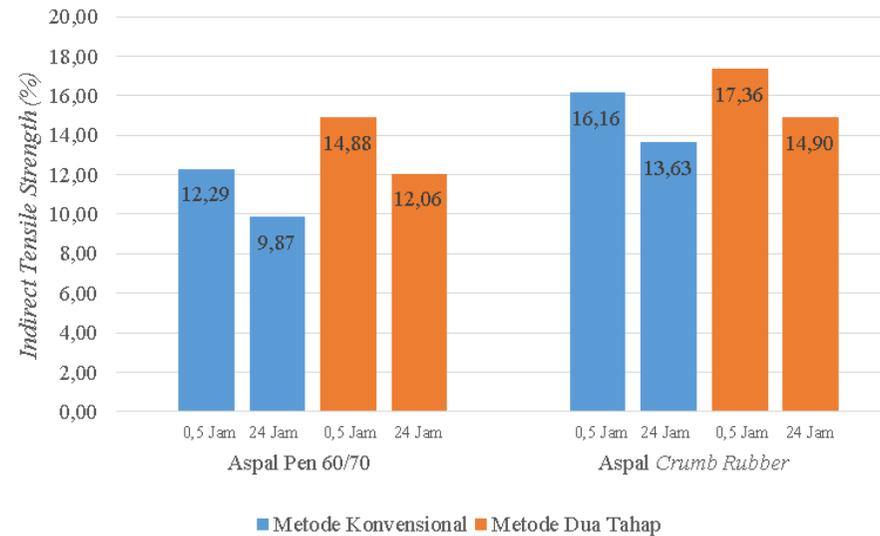
Aspal <i>Crumb Rubber</i> Metode Dua Tahap									
Sampel	Tebal (mm)			Rerata	Angka Koreksi	Meas	Stabilitas	A0	ITS (kg/cm <sup>2</sup> )
Metode Dua Tahap 1	70,2	71,7	70,9	70,93	0,84	37	617,5415144	0,159	13,80
Metode Dua Tahap 2	69,5	68,9	68,8	69,07	0,88	40	696,47913	0,159	15,99
Metode Dua Tahap 3	68,7	68,8	68,9	68,80	0,88	37	647,9219573	0,159	14,93
Rata - rata									14,90

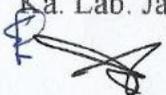
Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

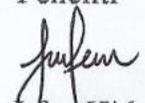
Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 34 Grafik Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* 0,5 Jam dan 24 Jam pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran**

**GRAFIK HASIL PENGUJIAN *INDIRECT TENSILE STRENGTH (ITS)* 0,5 JAM DAN 24 JAM PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN**



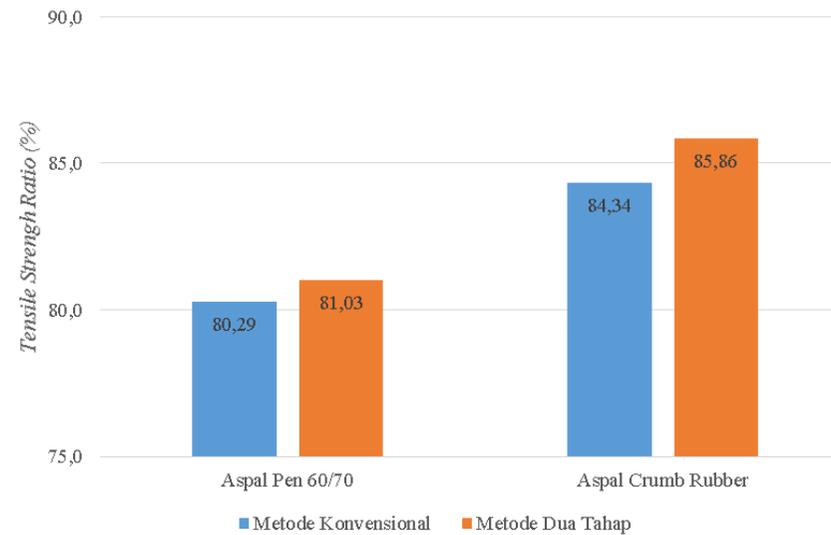
Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti  
  
Muh Hfan Hidayat  
14511320



Lampiran 35 Grafik Hasil *Tensile Strength Ratio (TSR)* pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL *TENSILE STRENGTH RATIO (TSR)* PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN



Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya

Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti

Muh Irfan Hidayat  
14511320

**Lampiran 36 Tabel Pengujian *Cantabro Test* pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran**

**TABEL PENGUJIAN *CANTABRO TEST* PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN**

Tanggal Pengujian : 16 Maret 2020  
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 mm

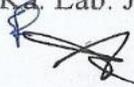
Dikerjakan Oleh : Muhammad Irfan Hidayat  
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah,S.T.,M.T.,Ph.D.

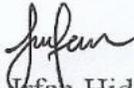
Sampel	Kode	Berat sebelum uji (gram)	Berat sesudah uji (gram)	<i>Cantabro Loss (%)</i>
Aspal Pen 60/70 Metode Konvensional	A1	1169,46	1036,25	11,39
	A2	1168,38	1085,6	7,09
	A3	1162,12	1041,88	10,35
Rata - rata				9,61

Sampel	Kode	Berat sebelum uji (gram)	Berat sesudah uji (gram)	<i>Cantabro Loss (%)</i>
Aspal Pen 60/70 Metode Bertahap	B1	1169,65	1052,97	9,98
	B2	1167,2	1087,5	6,83
	B3	1118,47	1052,8	5,87
Rata - rata				7,56

Sampel	Kode	Berat sebelum uji (gram)	Berat sesudah uji (gram)	<i>Cantabro Loss (%)</i>
Aspal <i>Crumb Rubber</i> Metode Konvensional	A1	1168,66	1105,55	5,40
	A2	1162,53	1102,09	5,20
	A3	1178,75	1155,99	1,93
Rata - rata				4,18

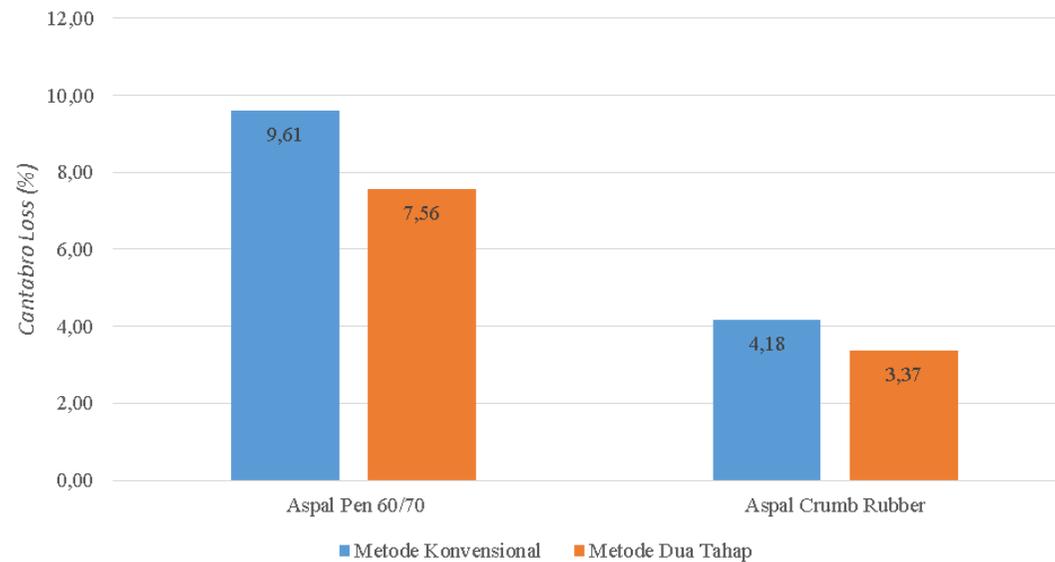
Sampel	Kode	Berat sebelum uji (gram)	Berat sesudah uji (gram)	<i>Cantabro Loss (%)</i>
Aspal <i>Crumb Rubber</i> Metode Dua Tahap	B1	1171,47	1128,9	3,63
	B2	1169,14	1130,63	3,29
	B3	1178,48	1141,08	3,17
Rata - rata				3,37

Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya  
  
Ir. Subarkah, M.T.

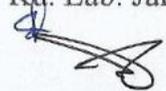
Peneliti  
  
Muh Irfan Hidayat  
14511320

### Lampiran 37 Grafik Hasil *Cantabro Loss* pada KAO Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber* dengan Dua Metode Pencampuran

#### GRAFIK HASIL *CANTABRO LOSS* PADA KAO ASPAL PEN 60/70 DAN ASPAL *CRUMB RUBBER* DENGAN DUA METODE PENCAMPURAN

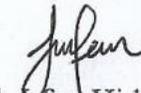


Mengetahui,  
Ka. Lab. Jalan Raya



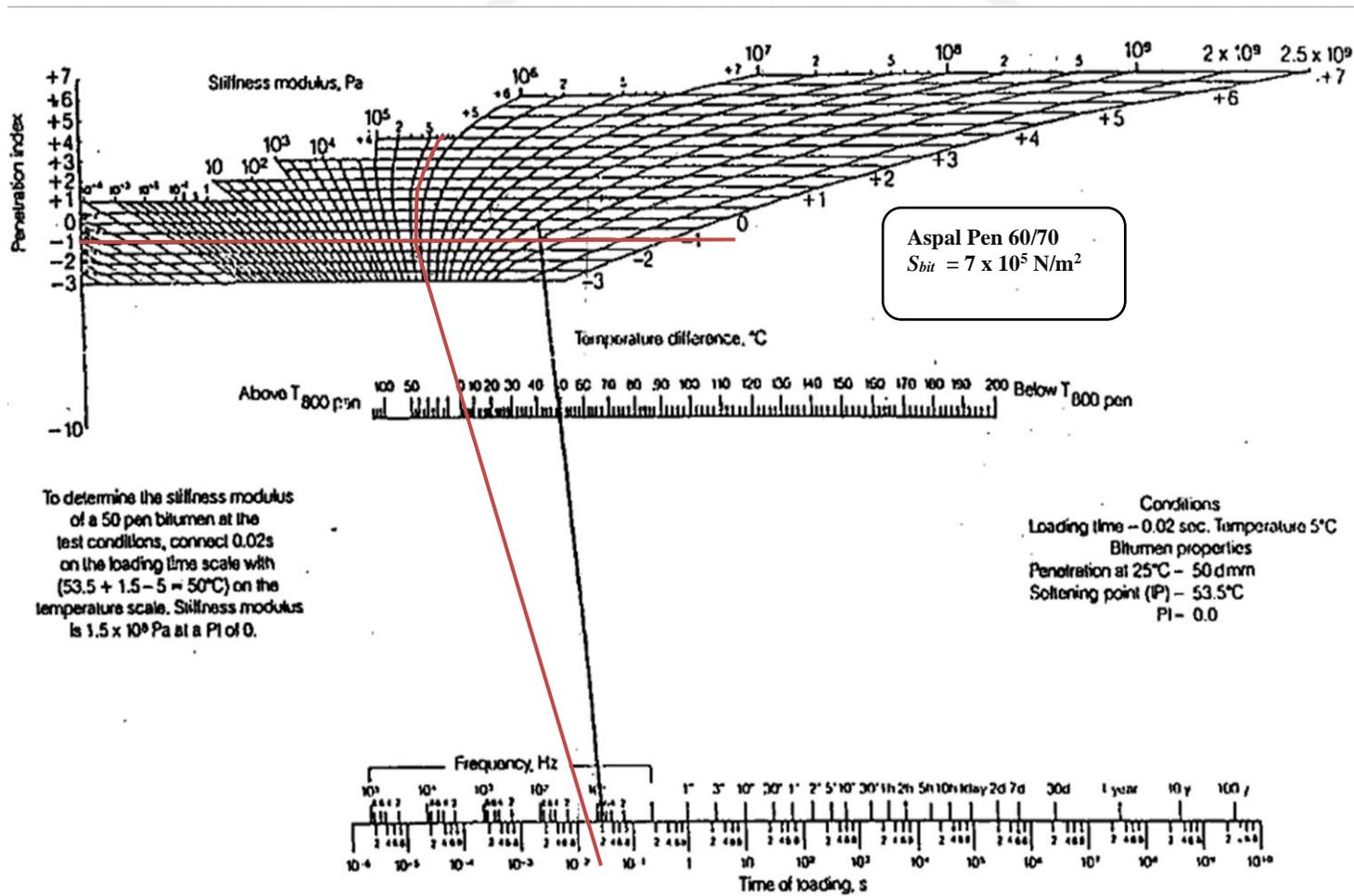
Ir. Subarkah, M.T.

Peneliti

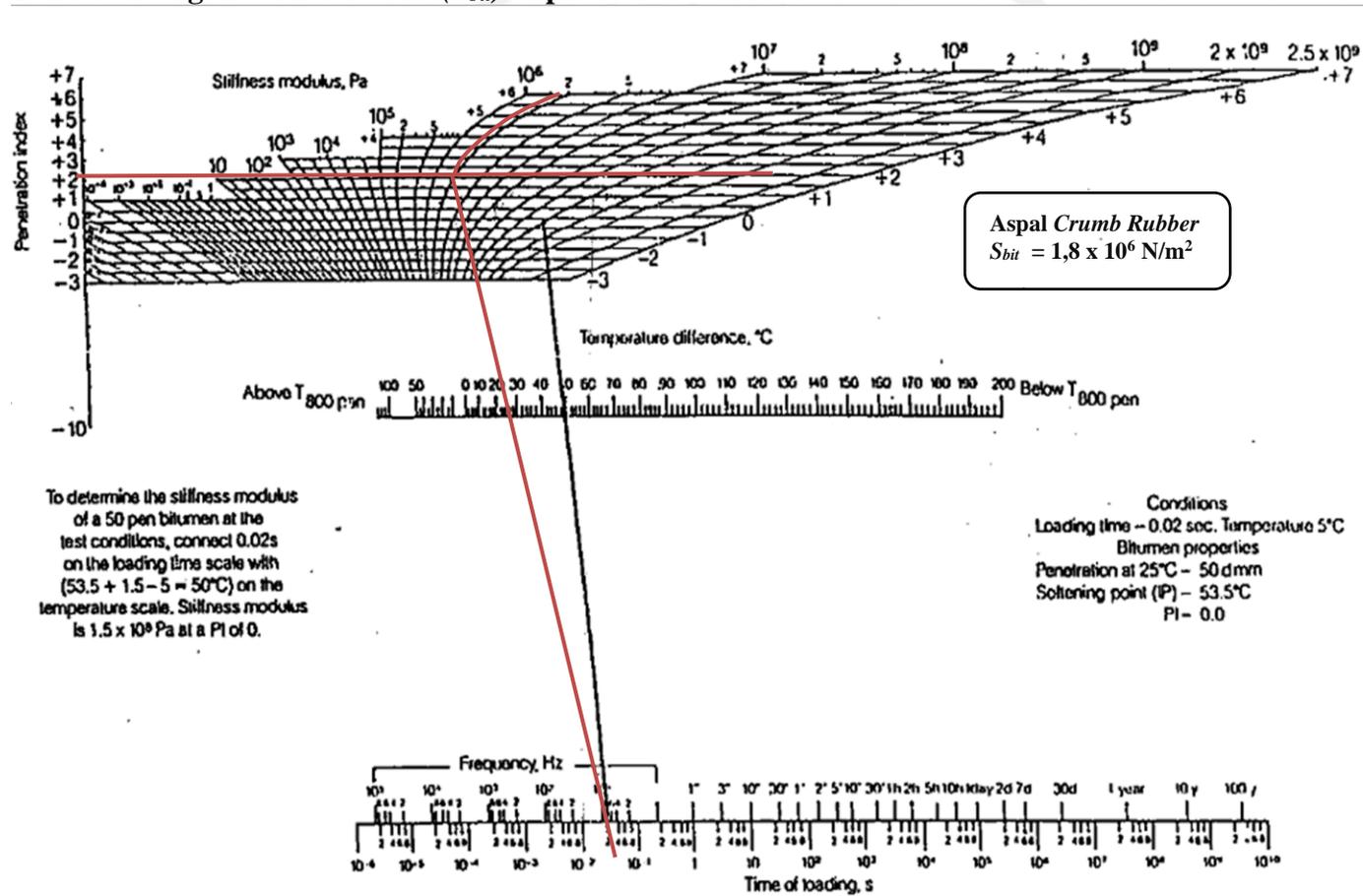


Muh Irfan Hidayat  
14511320

Lampiran 38 Grafik Nomogram Vander Poel ( $S_{bit}$ ) Aspal Pen 60/70



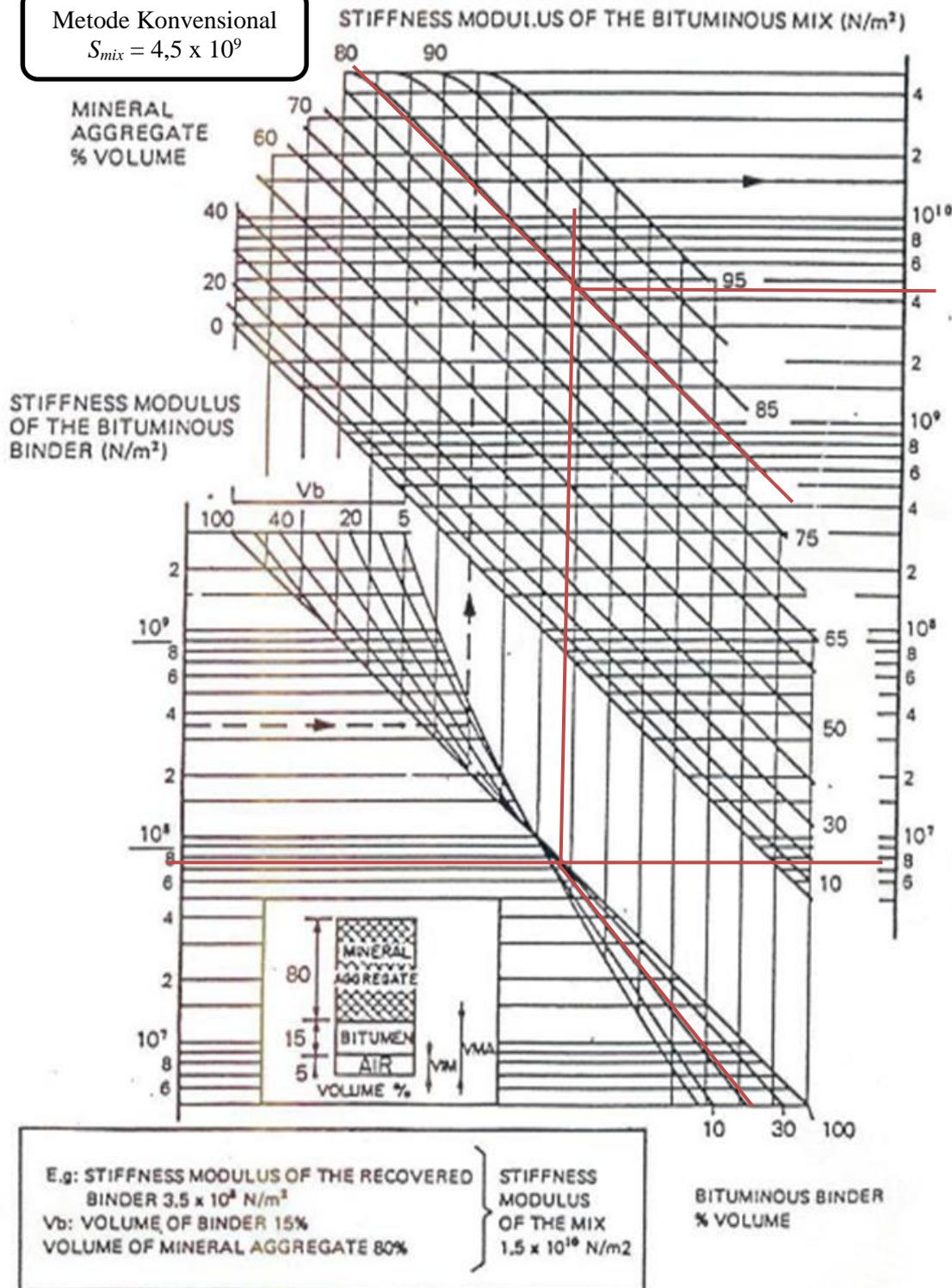
Lampiran 39 Grafik Nomogram Vander Poel ( $S_{bit}$ ) *Aspal Crumb Rubber*



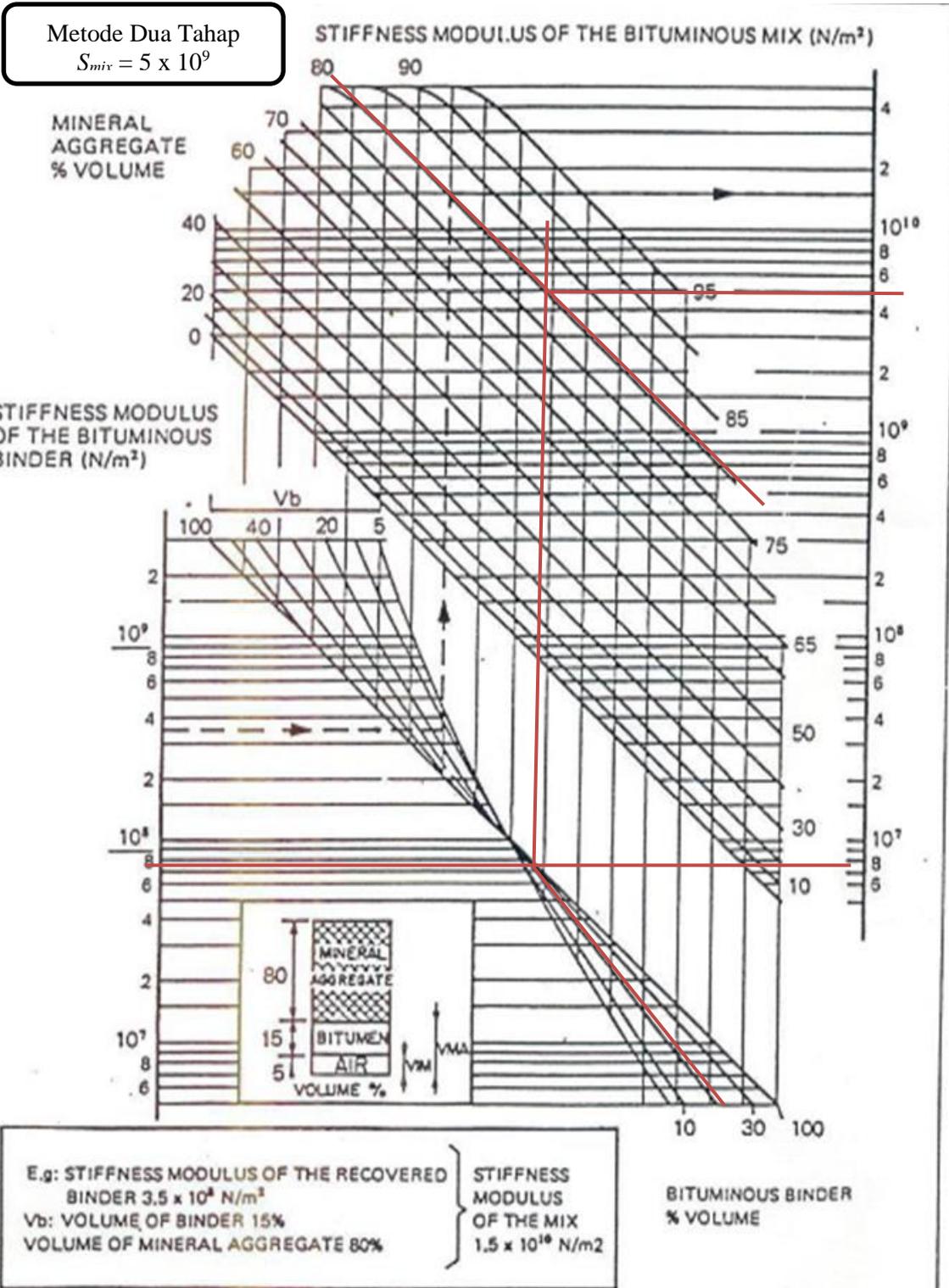
Lampiran 40 Grafik Nomogram *Stiffness* Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Konvensional

Metode Konvensional

$$S_{mix} = 4,5 \times 10^9$$



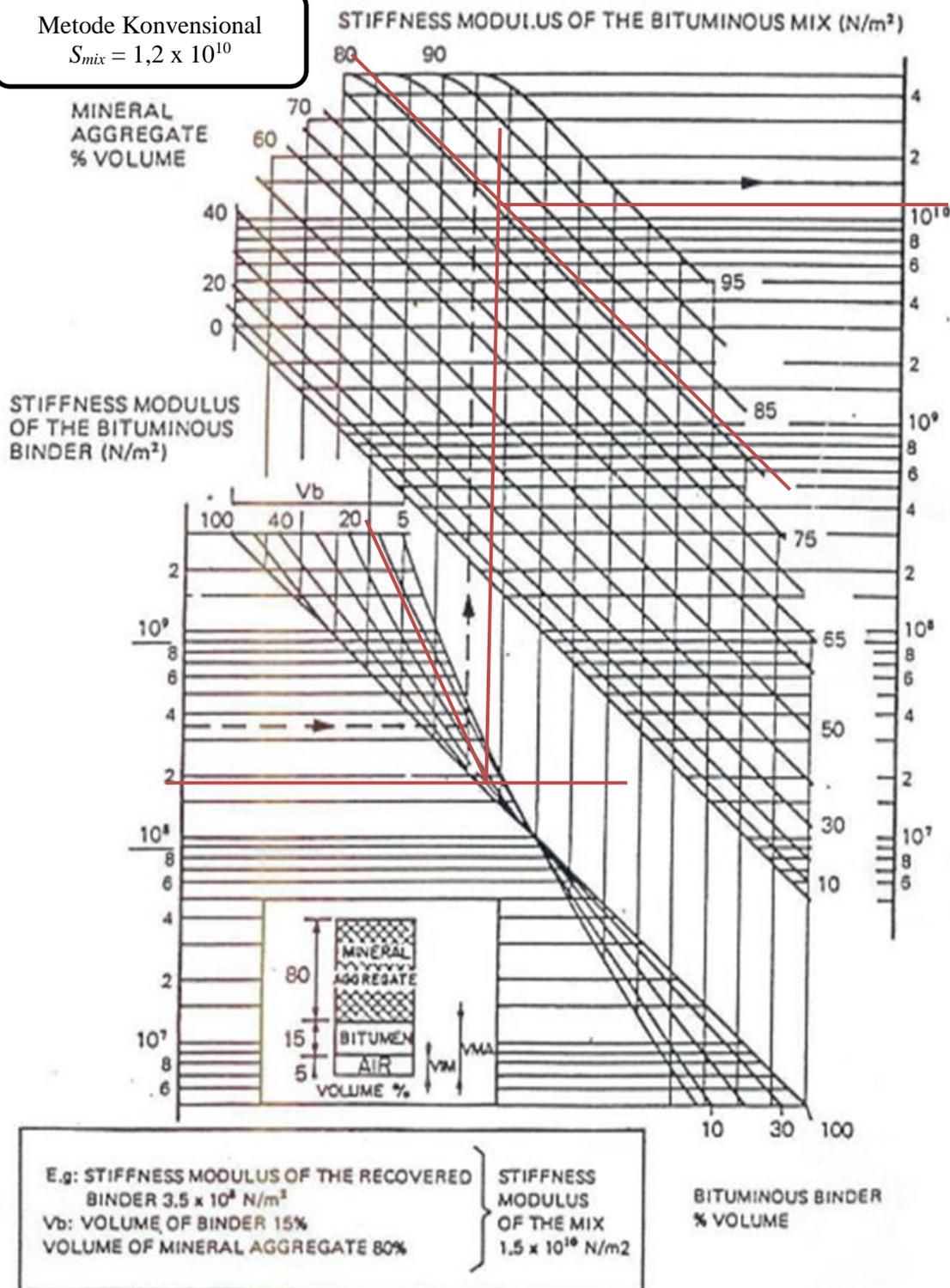
Lampiran 41 Grafik Nomogram *Stiffness* Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap



Lampiran 42 Grafik Nomogram *Stiffness* Modulus Campuran ( $S_{mix}$ ) Aspal Pen 60/70 dengan Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode Konvensional

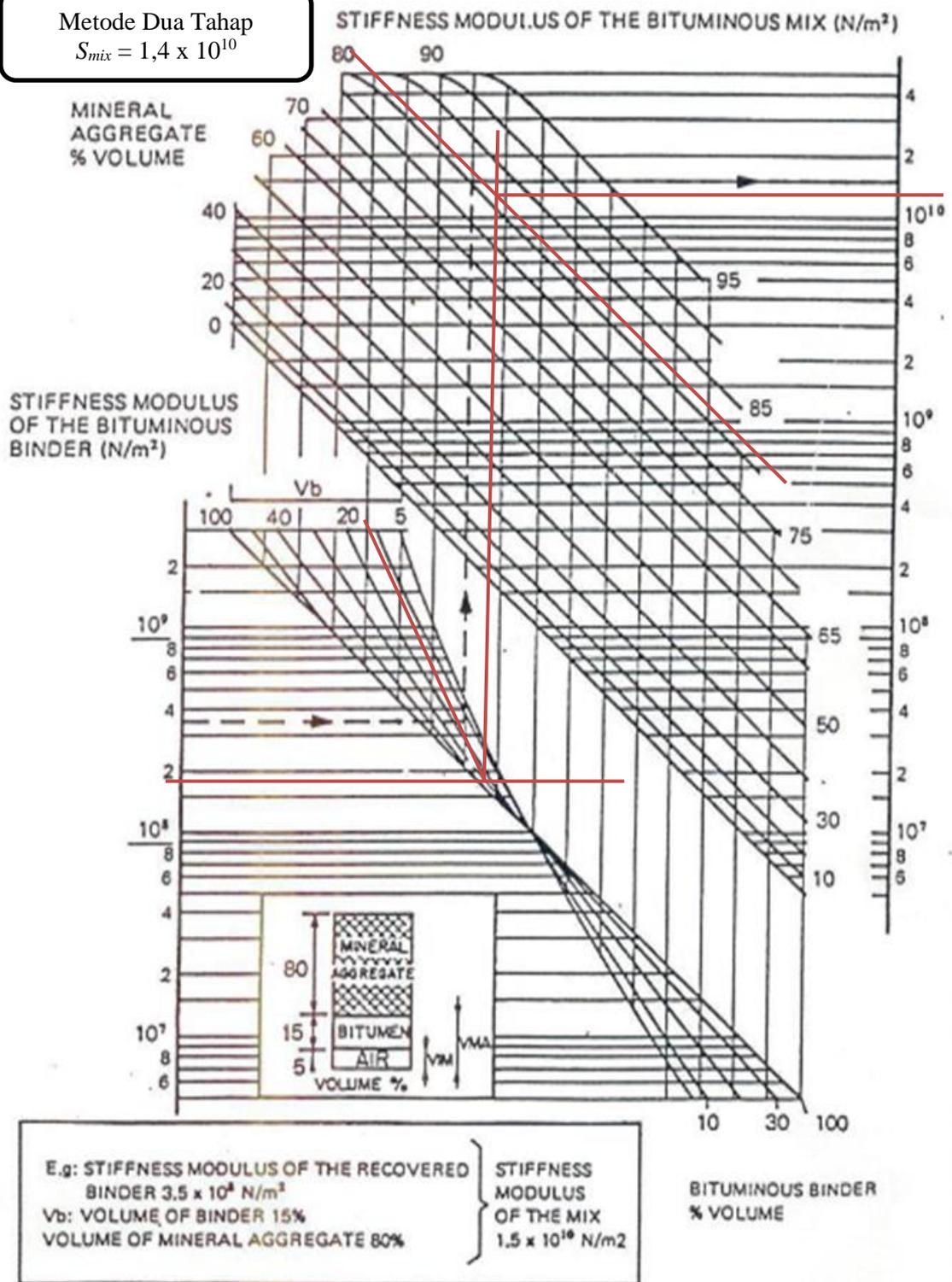
$$S_{mix} = 1,2 \times 10^{10}$$



Lampiran 43 Grafik Nomogram *Stiffness Modulus Campuran ( $S_{mix}$ )* Aspal  
*Crumb Rubber* dengan Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode Dua Tahap

$$S_{mix} = 1,4 \times 10^{10}$$



**Lampiran 44 Hasil Pemeriksaan Viskositas Aspal *Crumb Rubber* dengan Alat *Viscotester Rotasi***



**LABORATORIUM TRANSPORTASI**

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL & LINGKUNGAN FAKULTAS TEKNIK UGM  
Jl. Grafika No. 2 Kampus Universitas Gadjah Mada Yogyakarta 55281 telp. 0274-545675



**RESUME HASIL UJI ASPAL  
CRUM RUBBER**

No.	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi		Hasil	Satuan
		min.	max.		
1.	Viskositas pada suhu 180°C	-	-	494,9	Cst
2.	Suhu pepadatan	-	-	184,0	°C
3.	Suhu pencampuran	-	-	198,0	°C

Catatan :

Yogyakarta, 20 Januari 2020

Diperiksa oleh,

  
( Sani Primawista, A.Md )

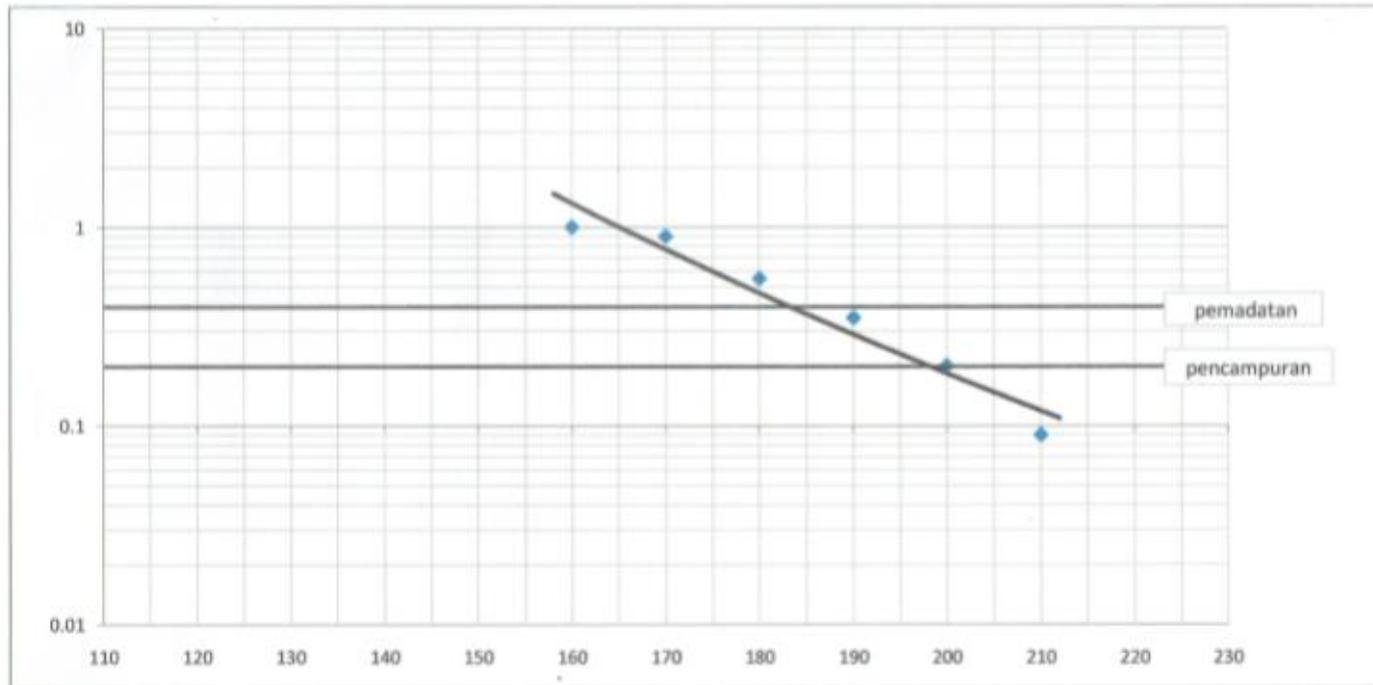


Lampiran 45 Grafik Hasil Pemeriksaan Viskositas Aspal *Crumb Rubber*



LABORATORIUM TRANSPORTASI

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL & LINGKUNGAN FAKULTAS TEKNIK UGM  
Jl. Grafika No. 2 Kampus Universitas Gadjah Mada Yogyakarta 55281 telp. 0274-545675



## Lampiran 46 Hasil Analisis *T-test* Pengujian Sifat Fisik Aspal Pen 60/70 Terhadap Aspal *Crumb Rubber*

### 1. Berat Jenis

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Berat Jenis	Equal variances assumed	.	.	-4.638	2	.043	-.02100	.00453	-.04048	-.00152
	Equal variances not assumed			-4.638	1.025	.131	-.02100	.00453	-.07536	.03336

### 2. Penetrasi

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Penetrasi	Equal variances assumed	.	.	5.088	2	.037	7.70000	1.51327	1.18890	14.21110
	Equal variances not assumed			5.088	1.036	.117	7.70000	1.51327	-10.03638	25.43638

### Lampiran 46 Lanjutan Hasil Analisis *T-test* Pengujian Sifat Fisik Aspal Pen 60/70 Terhadap Aspal *Crumb Rubber*

#### 3. Daktilitas

		Group Statistics			
Jenis Aspal		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Daktilitas	Aspal Pen 60/70	2	164.0000	.00000 <sup>a</sup>	.00000
	Aspal Crumb Rubber	2	164.0000	.00000 <sup>a</sup>	.00000

a. t cannot be computed because the standard deviations of both groups are 0.

#### 4. Titik Nyala

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Titik Nyala	Equal variances assumed	.	.	5.400	2	.033	13.50000	2.50000	2.74337	24.25663
	Equal variances not assumed			5.400	1.855	.038	13.50000	2.50000	1.89339	25.10661

#### 5. Titik Bakar

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Titik Bakar	Equal variances assumed	.	.	6.379	2	.024	11.50000	1.80278	3.74328	19.25672
	Equal variances not assumed			6.379	1.742	.033	11.50000	1.80278	2.53294	20.46706

## Lampiran 46 Lanjutan Hasil Analisis *T-test* Pengujian Sifat Fisik Aspal Pen 60/70 Terhadap Aspal *Crumb Rubber*

### 6. Titik Lembek

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Titik Lembek	Equal variances assumed	.	.	-54.537	2	.000	-15.90000	.29155	-17.15443	-14.64557
	Equal variances not assumed			-54.537	1.637	.001	-15.90000	.29155	-17.46214	-14.33786

### 7. Kelarutan dalam *TCE*

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Kelarutan dalam	Equal variances assumed	.	.	1.134	2	.374	.36500	.32191	-1.02006	1.75006
TCE	Equal variances not assumed			1.134	1.024	.457	.36500	.32191	-3.50618	4.23618

## Lampiran 47 Hasil Analisis *T*-test Pengujian *Marshall* dengan campuran aspal *Crumb Rubber* terhadap campuran aspal Pen 60/70

### 1. VITM

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
VITM	Equal variances assumed	.	.	-2.065	2	.175	-.33500	.16225	-1.03310	.36310
	Equal variances not assumed			-2.065	1.742	.193	-.33500	.16225	-1.14204	.47204

### 2. VFWA

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
VFWA	Equal variances assumed	.	.	2.726	2	.112	1.87500	.68784	-1.08454	4.83454
	Equal variances not assumed			2.726	1.755	.129	1.87500	.68784	-1.51742	5.26742

### 3. VMA

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
VMA	Equal variances assumed	.	.	2.726	2	.112	1.87500	.68784	-1.08454	4.83454
	Equal variances not assumed			2.726	1.755	.129	1.87500	.68784	-1.51742	5.26742

## Lampiran 47 Lanjutan Hasil Analisis *T*-test Pengujian *Marshall* dengan campuran aspal *Crumb Rubber* terhadap campuran aspal Pen 60/70.

### 4. Density

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Density	Equal variances assumed	.	.	.469	2	.686	.00150	.00320	-.01228	.01528
	Equal variances not assumed			.469	1.908	.687	.00150	.00320	-.01293	.01593

### 5. Stabilitas

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Stabilitas	Equal variances assumed	.	.	-32.509	2	.001	-108.75000	3.34522	-123.14332	-94.35668
	Equal variances not assumed			-32.509	1.030	.018	-108.75000	3.34522	-148.39495	-69.10505

### 6. Flow

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Flow	Equal variances assumed	.	.	9.674	2	.011	.50500	.05220	.28039	.72961
	Equal variances not assumed			9.674	1.179	.046	.50500	.05220	.03782	.97218

**Lampiran 47 Lanjutan Hasil Analisis *T-test* Pengujian *Marshall* dengan campuran aspal *Crumb Rubber* terhadap campuran aspal Pen 60/70**

7. MQ

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
MQ	Equal variances assumed	.	.	-10.381	2	.009	-64.07000	6.17207	-90.62629	-37.51371
	Equal variances not assumed			-10.381	1.088	.051	-64.07000	6.17207	-128.95211	.81211

**Lampiran 48 Hasil Analisis *T*-test Pengujian *IRS*, *ITS*, *TSR*, dan *Cantabro* dengan campuran aspal *Crumb Rubber* terhadap campuran aspal Pen 60/70**

1. *IRS*

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
IRS	Equal variances assumed	.	.	-5.864	2	.028	-2.34000	.39906	-4.05702	-.62298
	Equal variances not assumed			-5.864	1.148	.085	-2.34000	.39906	-6.09950	1.41950

2. *ITS*

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
ITS	Equal variances assumed	.	.	5.178	2	.035	4.62000	.89222	.78110	8.45890
	Equal variances not assumed			5.178	1.486	.063	4.62000	.89222	-.81805	10.05805

**Lampiran 48 Lanjutan Hasil Analisis *T-test* Pengujian *IRS, ITS, TSR*, dan *Cantabro* dengan campuran aspal *Crumb Rubber* terhadap campuran aspal Pen 60/70**

3. *TSR*

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
TSR	Equal variances assumed	.	.	5.178	2	.035	4.62000	.89222	.78110	8.45890
	Equal variances not assumed			5.178	1.486	.063	4.62000	.89222	-.81805	10.05805

4. *Cantabro Loss*

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
Cantabro	Equal variances assumed	.	.	5.178	2	.035	4.62000	.89222	.78110	8.45890
	Equal variances not assumed			5.178	1.486	.063	4.62000	.89222	-.81805	10.05805

## Lampiran 49 Hasil Analisis *Anova* untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Marshall*

### 1. Stabilitas

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	15314.063	1	15314.063	112.117	.009
Within Groups	273.181	2	136.591		
Total	15587.244	3			

### 2. *Flow*

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.164	1	.164	10.431	.084
Within Groups	.031	2	.016		
Total	.195	3			

### 3. *MQ*

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	27.563	1	27.563	52.575	.018
Within Groups	1.049	2	.524		
Total	28.611	3			

### 4. *VITM*

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.189	1	.189	20.292	.046
Within Groups	.019	2	.009		
Total	.208	3			

## Lampiran 49 Lanjutan Hasil Analisis *Anova* untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Marshall*

### 5. *VFWA*

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4.101	1	4.101	54.584	.018
Within Groups	.150	2	.075		
Total	4.251	3			

### 6. *VMA*

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.008	1	.008	.430	.579
Within Groups	.038	2	.019		
Total	.046	3			

### 7. *Density*

#### ANOVA

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.008	1	.008	.430	.579
Within Groups	.038	2	.019		
Total	.046	3			

**Lampiran 50 Hasil Analisis Anova untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik Immersion Test**

**Test of Homogeneity of Variances**

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Jenis Aspal	Based on Mean	1980704062 8558204000 00000.000	1	2	.000
	Based on Median	1980704062 8558204000 00000.000	1	2	.000
	Based on Median and with adjusted df	1980704062 8558204000 00000.000	1	1.000	.000
	Based on trimmed mean	1980704062 8558204000 00000.000	1	2	.000

**ANOVA**

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14.746	1	14.746	608.066	.002
Within Groups	.049	2	.024		
Total	14.794	3			

**Lampiran 51 Hasil Analisis Anova untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Indirect Tensile Strenght***

**Test of Homogeneity of Variances**

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Jenis Aspal	Based on Mean	1224613862 3504852000 0000000000 .000	1	2	.000
	Based on Median	1224613862 3504852000 0000000000 .000	1	2	.000
	Based on Median and with adjusted df	1224613862 3504852000 0000000000 .000	1	1.471	.000
	Based on trimmed mean	1224613862 3504852000 0000000000 .000	1	2	.000

**ANOVA**

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16.201	1	16.201	29.032	.033
Within Groups	1.116	2	.558		
Total	17.317	3			

**Lampiran 52 Hasil Analisis Anova untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik Tensile Strength Ratio**

**Test of Homogeneity of Variances**

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Jenis Aspal	Based on Mean	1224613862 3504852000 0000000000. 000	1	2	.000
	Based on Median	1224613862 3504852000 0000000000. 000	1	2	.000
	Based on Median and with adjusted df	1224613862 3504852000 0000000000. 000	1	1.471	.000
	Based on trimmed mean	1224613862 3504852000 0000000000. 000	1	2	.000

**ANOVA**

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	19.714	1	19.714	27.500	.034
Within Groups	1.434	2	.717		
Total	21.147	3			

**Lampiran 53 Hasil Analisis *Anova* untuk Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik *Cantabro Loss***

**Test of Homogeneity of Variances**

		Levene			
		Statistic	df1	df2	Sig.
Jenis Aspal	Based on Mean	1949139562	1	2	.000
		9109262000			
		0000000000			
		0.000			
	Based on Median	1949139562	1	2	.000
		9109262000			
		0000000000			
		0.000			
	Based on Median and with adjusted df	1949139562	1	1.000	.000
		9109262000			
		0000000000			
		0.000			
	Based on trimmed mean	1949139562	1	2	.000
		9109262000			
		0000000000			
		0.000			

**ANOVA**

Metode Pencampuran Dua Tahap

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	23.136	1	23.136	19.048	.049
Within Groups	2.429	2	1.215		
Total	25.565	3			