



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

PROYEK AKHIR - VC 191845

**KARAKTERISTIK MARSHALL PADA PEMANFAATAN
MODIFIKASI *CRUMB RUBBER* DARI LIMBAH BAN
KENDARAAN PADA CAMPURAN *HOT ROLLED SHEET-
WEARING COURSE (HRS-WC)***

MAHARAMILIA NEDIA RIZKY

NRP. 10111710013056

DOSEN PEMBIMBING

Ir. RACHMAD BASUKI, MS.

NIP. 19641114198903 1 001

PROGRAM SARJANA TERAPAN

DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL

FAKULTAS VOKASI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA

2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



PROYEK AKHIR - VC 191845

**KARAKTERISTIK MARSHALL PADA PEMANFAATAN
MODIFIKASI *CRUMB RUBBER* DARI LIMBAH BAN
KENDARAAN PADA CAMPURAN *HOT ROLLED SHEET -
WEARING COURSE (HRS - WC)***

MAHARAMILIA NEDIA RIZKY

NRP. 10111710013056

DOSEN PEMBIMBING

Ir. RACHMAD BASUKI, MS.

NIP. 19641114 198903 1 001

PROGRAM SARJANA TERAPAN

DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL

FAKULTAS VOKASI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA

2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - VC 191845

MARSHALL CHARACTERISTICS OF UTILIZATION OF CRUMB RUBBER MODIFICATION FROM WASTE VEHICLE TIRES IN MIXED HOT ROLLED SHEET - WEARING COURSE (HRS - WC)

MAHARAMILIA NEDIA RIZKY

NRP. 10111710013056

Counselor Lecturer

Ir. RACHMAD BASUKI, MS.

NIP. 19641114 198903 1 001

BACHELOR APPLIED DEGREE PROGRAM

DEPARTMENT OF CIVIL INFRASTRUCTURE ENGINEERING

FACULTY OF VOCATION

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA

2021

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

HALAMAN PENGESAHAN

**KARAKTERISTIK MARSHALL PADA PEMANFAATAN
MODIFIKASI *CRUMB RUBBER* DARI LIMBAH BAN KENDARAAN
PADA CAMPURAN *HOT ROLLED SHEET – WEARING COURSE*
(*HRS – WC*)**

PROYEK AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains Terapan
Pada
Program Studi Sarjana Terapan
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

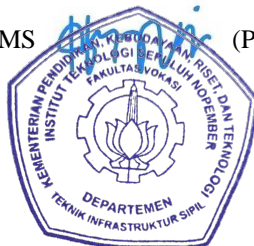


MAHARAMILIA NEDIA RIZKY

NRP. 10111710013056

Disetujui Oleh Dosen Pembimbing Proyek Akhir Terapan:

1. Ir. Rachmad Basuki, MS (Pembimbing I)



**SURABAYA
AGUSTUS, 2021**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FAKULTAS VOKASI

DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL

Kampus ITS, Jl. Menur 127 Surabaya 60116

Telp. 031-5947637 Fax. 031-5938025

ASISTENSI PROYEK AKHIR TERAPAN

Nama : MAHARAMILIA NEDIA RIZKY
NRP : 10111710013056
Judul Tugas Akhir : KARAKTERISTIK MARSHALL PADA PEMANFAATAN MODIFIKASI *CRUMB RUBBER* DARI LIMBAH BAN KENDARAAN PADA CAMPURAN *HOT ROLLED SHEET – WEARING COURSE (HRS – WC)*

Dosen Pembimbing : Ir. RACHMAD BASUKI, MS.

No	Tanggal	Tugas/Materi yang dibahas	Keterangan		
			B	C	K
1.	20/02/2021	Pembahasan mengenai isi laporan			
		- Latar belakang diperbaiki lagi untuk (presentase crumb rubber, referensi jurnal harus kuat)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		- Mencari info mengenai ketentuan minimum layer Laston	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		- Mencari definisi Laston lebih detail lagi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		- Metode pencampuran crumb rubber yang dipakai harus seperti apa step by step nya	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	31/03/2021	Pembahasan mengenai uji cantabro loss	B	C	K
		- Mencari referensi mengenai cantabro loss yang dapat dijadikan pedoman untuk pembuatan benda uji	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		- Persiapan untuk blending agregat	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	01/05/2021	Pembahasan mengenai blending agregat	B	C	K
		- Mencari nilai batas atas dan batas bawah pada blending agregat untuk HRS WC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	25/05/2021	Pembahasan mengenai uji Indirect Tensile Strength (ITS)	B	C	K
		- Pengujian ITS tetap mengikuti ketentuan SNI	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.	04/06/2021	Pembahasan mengenai kendala compactor dan marshall	B	C	K
		- Alat compactor bermasalah saat melakukan pemadatan benda uji dan harus segera	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		dilakukan perbaikan			
		- Alat marshall otomatis juga tidak bisa digunakan, solusinya memakai alat marshall manual	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.	25/06/2021	Pembahasan mengenai hasil benda uji Marshall untuk KAO	B	C	K
		- Dari 5 benda uji yang sudah dibuat, pakai 3data saja yang paling terbaik untuk dijadikan rata – rata untuk parameter VIM VMA VFA dan Density	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**KARAKTERISTIK MARSHALL PADA PEMANFAATAN
MODIFIKASI *CRUMB RUBBER* DARI LIMBAH BAN
KENDARAAN PADA CAMPURAN *HOT ROLLED SHEET* –
*WEARING COURSE (HRS – WC)***

Nama : Maharamilia Nedia Rizky
NRP : 10111710013056
Jurusan : Teknik Infrastruktur Sipil,
Fakultas Vokasi, ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Rachmad Basuki, MS.
NIP : 19641114 198903 1 001

URAIAN SINGKAT

Jalan raya merupakan suatu moda transportasi utama yang sangat berperan penting dalam kehidupan masyarakat, dimana jalan raya memiliki fungsi dalam mendorong distribusi barang sekaligus jasa bagi masyarakat. Salah satu solusi untuk meningkatkan kualitas dari lapisan permukaan jalan adalah dengan penggunaan modifikasi *crumb rubber* pada campuran perkerasan jalan.

Tahapan dalam penelitian ini meliputi uji fisik material, pengujian KAO (Kadar Aspal Optimum), pengujian HRS – WC dengan penambahan modifikasi *crumb rubber*, dan analisa hasil pengujian *Marshall* dan *Indirect Tensile Strength (ITS)* beserta parameternya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini merupakan metode basah (*wet process*). Variasi kadar *crumb rubber* yang digunakan yaitu %; 5%; 10%; 15%; 20% dari total berat kadar aspal optimum (KAO). Pada penelitian ini analisa hasil meliputi *density*, *Void in Mix (VIM)*, *Void in Mineral Aggregate (VMA)*, *Void in Filled with Asphalt (VFA)*, Stabilitas *Marshall*, *flow*, *Marshall Quotient (MQ)*, *ITS Dry*, *ITS Wet*, Rasio *ITS (ITSR)*.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kadar *crumb rubber* optimum sebesar 10%, pada persentase ini, stabilitas marshall mengalami kenaikan hingga 9% sebesar 869,760 kg dibandingkan dengan campuran konvensional. Sedangkan campuran 10% *crumb rubber* juga dapat meningkatkan nilai ITS Dry, ITS Wet, serta ITS Ratio.

Kata Kunci : Perkerasan Jalan Raya, *Crumb Rubber*, Lataston Lapis Aus (*HRS-WC*), Karakteristik Marshall, Uji *Indirect Tensile Strength*

MARSHALL CHARACTERISTICS OF UTILIZATION OF CRUMB RUBBER MODIFICATION FROM WASTE VEHICLE TIRES IN MIXED HOT ROLLED SHEET – WEARING COURSE (HRS – WC)

Nama of Student : Maharamilia Nedia Rizky
NRP : 10111710013056
Department : Civil Infrastructure Engineering, FV, ITS
Counselor Lecturer : Ir. Rachmad Basuki, MS.
NIP : 19641114 198903 1 001

Abstrack

The highway is a major mode of transportation that plays an important role in people's lives, where the highway has a function in encouraging the distribution of goods as well as services for the community. One of the solutions to improve the quality of the road surface layer is the use of Modified Crumb Rubber in the mixture of road pavements.

The stages in this research include physical material testing, testing optimum asphalt content (KAO), HRS – WC test with the addition of crumb rubber modification, and analysis of Marshall and Indirect Tensile Strength (ITS) tests results along with parameters. The method used in this research is a wet method. The variation of crumb rubber content used is %; 5%; 10%; 15%; 20% of the total weight of the optimum asphalt content (KAO). In this research, the results analysis includes density testing, void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void in Filled with Asphalt (VFA), Marshall Stability, flow, Marshall Quotient, ITS Dry, Ratio ITS (ITSR).

The results of this study indicate that the optimum crumb rubber content value is 10%, at this percentage Marshall stability has increased up to 9% by 869,760 kg compared to conventional mixtures. Meanwhile a mixture of 10% crumb rubber can also increase the value of ITS Dry, ITS Wet, and ITS Ratio

Keyword : *Highway Pavement, Crumb Rubber, Hot Rolled Sheet – Wearing Course (HRS – WC), Marshall Characteristic, Indirect Tensile Strength Test*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat, ridho, dan pertolongan-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir terapan berjudul **“Karakteristik Marshall pada Pemanfaatan Modifikasi Crumb Rubber dari Limbah Ban Kendaraan pada Campuran Hot Rolled Sheet – Wearing Course (HRS – WC)”** guna memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Terapan pada Program Studi Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini tidak akan terlaksana tanpa bantuan dan bimbingan dari beberapa pihak. Pada kesempatan ini, saya ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan karunia-Nya, sehingga proposal terapan ini dapat terselesaikan
2. Orang tua, adik-adik dan juga keluarga saya yang tersayang, yang telah memberikan dukungan moril maupun materil serta selalu mendoakan sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Bapak dan Ibu dosen Tim Peneliti Aspal Departemen Teknik Infrastruktur Sipil yang telah membantu dan membimbing selama proses penyelesaian tugas akhir.
4. Seluruh dosen pengajar serta karyawan Teknik Infrastruktur Sipil FV ITS yang telah membimbing selama masa perkuliahan
5. Semua teman-teman dan seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang selama ini telah mendukung dan berpartisipasi dalam membantu menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa proposal tugas akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunan. Semoga dapat bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para pembaca.

Surabaya, 21 Agustus 2021

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
DAFTAR GAMBAR	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 LATASTON	5
2.1.1 Pengertian LATASTON.....	5
2.1.2 Spesifikasi LATASTON.....	6
2.2 Material Penyusun LATASTON	7
2.2.1 Agregat Kasar	7
2.2.2 Agregat Halus	7
2.2.3 Spesifikasi Agregat Gabungan.....	8
2.2.4 Bahan Aspal untuk Campuran Beraspal.....	9
2.3 Modifikasi <i>Crumb Rubber</i> dari Limbah Ban Kendaraan	10
2.4 Perencanaan Kadar Aspal.....	12
2.5 Pengujian <i>Marshall</i>	13
2.6 Parameter Pengujian <i>Marshall</i>	13
2.7 Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS).....	17

2.8	Parameter Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS).....	19
2.9	Review Jurnal	20
2.10	Penelitian Terdahulu	21
BAB III METODOLOGI		33
3.1	Diagram Alir Penelitian	33
3.2	Proses Pencampuran dengan Metode Basah	35
3.3	Lokasi Penelitian	35
3.4	Persiapan Alat dan Bahan	36
3.5	Pengecekan Material.....	37
3.6	Pencampuran Modifikasi <i>Crumb Rubber</i> dari Limbah Ban Kendaraan	38
3.7	Pembuatan Benda Uji	39
3.8	Pengujian Marshall	40
3.9	Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)	41
3.10	Variasi Benda Uji	41
3.11	Analisa dan Pembahasan.....	41
3.12	Kesimpulan dan Saran	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		43
4.1	Hasil Pengujian Material.....	43
4.1.1	Analisa Saringan Agregat	43
4.1.2	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat	47
4.1.3	Keausan Agregat.....	49
4.1.4	Hasil Pengujian Aspal.....	52
4.2	Perencanaan Proporsi Agregat Gabungan.....	52
4.3	Perencanaan Pembuatan Benda Uji	54
4.3.1	Penentuan Kadar Aspal Rencana.....	54

4.3.2	Variasi Kadar Aspal Rencana	57
4.4	Pengujian Karakteristik Marshall Kadar Aspal Rencana	60
4.4.1	<i>Density</i>	60
4.4.2	Void in Mix (VIM).....	62
4.4.3	Void in Mineral Agregate (VMA)	65
4.4.4	Void Filled with Asphalt (VFA)	67
4.4.5	<i>Flow</i>	68
4.4.6	Stabilitas	70
4.4.6	Marshall Quotient.....	72
4.4.7	Kadar Aspal Optimum (KAO).....	74
4.5	Perencanaan Pembuatan Benda Uji dengan Campuran Modifikasi Crumb Rubber	74
4.6	Pengujian Karakteristik Aspal Modifikasi	77
4.7	Pengujian Karakteristik <i>Marshall</i> Kadar Aspal Optimum dengan Penambahan Modifikasi <i>Crumb Rubber</i>	79
4.7.1	<i>Density</i>	79
4.7.2	Void in Mix (VIM).....	81
4.7.3	Void in Mineral Agregate (VMA).....	82
4.7.4	Void Filled with Asphalt (VFA)	84
4.7.5	Stabilitas	85
4.7.6	<i>Flow</i>	87
4.7.7	Marshall Quotient (MQ).....	88
4.7.8	Kadar Crumb Rubber Optimum.....	90
4.8	Perencanaan Pembuatan Benda Uji <i>Indirect Tensile Strength</i> (<i>ITS</i>)	91
4.9	Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i> pada Campuran Kadar Aspal Optimum & Modifikasi Crumb Rubber	92

4.9.1	<i>ITS Dry</i>	93
4.9.2	<i>ITS Wet</i>	95
4.9.3	<i>ITS Ratio</i>	99
4.9.4	Keserasian Hasil Kuat Tarik dan Stabilitas.....	101
4.10	Perbandingan Harga Campuran Aspal.....	101
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		105
5.1	Kesimpulan.....	105
5.2	Saran	106
DAFTAR PUSTAKA.....		107
BIODATA PENULIS.....		109
LAMPIRAN.....		113

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Tebal Nominal Campuran Beraspal	6
Tabel 2. 2	Ketentuan sifat - sifat campuran Lataston (HRS)	6
Tabel 2. 3	Ketentuan Agregat Kasar	7
Tabel 2. 4	Ketentuan Agregat Halus	8
Tabel 2. 5	Spesifikasi Gradasi Agregat Gabungan	8
Tabel 2. 6	Contoh Batas - batas "Bahan Bergradasi Senjang"	9
Tabel 2. 7	Ketentuan untuk Aspal Keras.....	9
Tabel 2. 8	Tabel Review Jurnal	20
Tabel 2. 9	Hasil Pengujian Marshall.....	21
Tabel 2. 10	Hasil Pengujian Aspal Modifikasi Polimer dengan Crumb Rubber	23
Tabel 2. 11	Perbandingan Nilai Karakteristik Marshall, Kehilangan Berat dan Kuat Tarik.....	25
Tabel 2. 12	Sifat Fisik Aspal Penetrasi 60/70	26
Tabel 2. 13	Sifat Fisik Aspal Modifikasi Crumb Rubber	26
Tabel 2. 14	Perbandingan hasil Uji Marshall pada seluruh campuran aspal	27
Tabel 2. 15	Resume Penelitian Terdahulu	29
Tabel 4. 1	Analisa Saringan Agregat Kasar 10-10 mm	43
Tabel 4. 2	Analisa Saringan Agregat Sedang 5-10 mm	44
Tabel 4. 3	Analisa Saringan Agregat Sedang 0-5 mm	45
Tabel 4. 4	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar 10-10 mm	47
Tabel 4. 5	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Sedang 5-10 mm	48
Tabel 4. 6	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 0-5 mm	49
Tabel 4. 7	Hasil Uji Sifat Fisik Agregat.....	50
Tabel 4. 8	Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat	51
Tabel 4. 9	Hasil Uji Karakteristik Aspal.....	52
Tabel 4. 10	Presentase Penggabungan Agregat (Combined Aggregate)	53
Tabel 4. 11	Presentase Variasi Campuran.....	54
Tabel 4. 12	Perkiraan Kadar Aspal.....	57
Tabel 4. 13	Variasi Campuran Kadar Aspal 5,89%	58
Tabel 4. 14	Variasi Campuran Kadar Aspal 6,39%	59
Tabel 4. 15	Variasi Campuran Kadar Aspal 6,89%	59

Tabel 4. 16 Variasi Campuran Kadar Aspal 7,39%	59
Tabel 4. 17 Variasi Campuran Kadar Aspal 7,89%	60
Tabel 4. 18 Hasil Density	60
Tabel 4. 19 Hasil Nilai VIM	62
Tabel 4. 20 Hasil Nilai VMA	65
Tabel 4. 21 Hasil Nilai VFA	67
Tabel 4. 22 Hasil Nilai Flow	68
Tabel 4. 23 Hasil Nilai Stabilitas	70
Tabel 4. 24 Hasil Nilai MQ	72
Tabel 4. 25 Kadar Aspal Optimum	74
Tabel 4. 26 Proporsi Campuran KAO + Crumb Rubber 5%	75
Tabel 4. 27 Proporsi Campuran KAO + Crumb Rubber 10%	76
Tabel 4. 28 Proporsi Campuran KAO + Crumb Rubber 15%	76
Tabel 4. 29 Proporsi Campuran KAO + Crumb Rubber 20%	76
Tabel 4. 30 Nilai Berat Jenis Aspal Modifikasi	77
Tabel 4. 31 Nilai Penetrasi Aspal Modifikasi	77
Tabel 4. 32 Nilai Kehilangan Berat Aspal Modifikasi	77
Tabel 4. 33 Nilai Daktilitas Aspal Modifikasi	78
Tabel 4. 34 Nilai Titik Lembek Aspal Modifikasi	78
Tabel 4. 35 Nilai Titik Bakar Aspal Modifikasi	78
Tabel 4. 36 Nilai Titik Nyala Aspal Modifikasi	79
Tabel 4. 37 Hasil Nilai Density dengan Penambahan CR	79
Tabel 4. 38 Nilai VIM dengan Penambahan CR	81
Tabel 4. 39 Nilai VMA dengan Penambahan CR	83
Tabel 4. 40 Nilai VFA dengan Penambahan CR	84
Tabel 4. 41 Nilai Stabilitas dengan Penambahan CR	86
Tabel 4. 42 Nilai Flow dengan Penambahan CR	87
Tabel 4. 43 Nilai MQ dengan Penambahan CR	89
Tabel 4. 44 Kadar Crumb Rubber Optimum	90
Tabel 4. 45 Pemilihan Tumbukan Benda Uji Konvensional	91
Tabel 4. 46 Pemilihan Tumbukan Benda Uji Modifikasi CR	92
Tabel 4. 47 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Dry 0% CR	93
Tabel 4. 48 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Dry 10% CR	93
Tabel 4. 49 Hasil Nilai Derajat Kejenuhan (S') 0% CR	95
Tabel 4. 50 Hasil Nilai Derajat Kejenuhan (S') 10% CR	96
Tabel 4. 51 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Wet 0% CR	98

Tabel 4. 52 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Wet 10% CR.....	98
Tabel 4. 53 Hasil Perhitungan Rasio Pengujian ITS 0% CR	99
Tabel 4. 54 Hasil Perhitungan Rasio Pengujian ITS 10% CR	100
Tabel 4. 55 Anggaran Biaya Lataston Konvensional	102
Tabel 4. 56 Anggaran Biaya Lataston Modifikasi	103

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Grafik Unsur yang terkandung dalam Crumb Rubber	11
Gambar 2. 2 Contoh Hasil Modifikasi <i>Crumb Rubber</i>	12
Gambar 2. 3 Alat Uji Marshall dan Volumetrik Campuran Beraspal... 13	
Gambar 2. 4 Indirect Tensile Strength Test	18
Gambar 2. 5 Grafik Hubungan Kadar aspal dengan Stabilitas.....	22
Gambar 2. 6 Kadar aspal optimum (KAO) berdasarkan persentase crumb rubber dalam aspal	24
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 3. 2 Metode Pencampuran Basah	35
Gambar 3. 3 Lokasi Penelitian	35
Gambar 3. 4 Modifikasi Crumb Rubber (Mesh 40) dan (Mesh 60)	37
Gambar 4. 1 Grafik Proporsi Agregat	54
Gambar 4. 2 Grafik Hasil Density	62
Gambar 4. 3 Grafik Hasil VIM.....	64
Gambar 4. 4 Grafik Hasil VMA	66
Gambar 4. 5 Grafik Hasil VFA	68
Gambar 4. 6 Grafik Hasil Flow	69
Gambar 4. 7 Grafik Hasil Stabilitas	71
Gambar 4. 8 Grafik Hasil MQ.....	73
Gambar 4. 9 Grafik Nilai Density dengan Penambahan CR.....	80
Gambar 4. 10 Grafik Nilai VIM dengan Penambahan CR	82
Gambar 4. 11 Grafik Nilai VMA dengan Penambahan CR.....	83
Gambar 4. 12 Grafik Nilai VFA dengan Penambahan CR	85
Gambar 4. 13 Grafik Nilai Stabilitas dengan Penambahan CR.....	86
Gambar 4. 14 Grafik Nilai Flow dengan Penambahan CR	88
Gambar 4. 15 Grafik Nilai MQ dengan Penambahan CR.....	89
Gambar 4. 16 Grafik Pemilihan Tumbukan Benda Uji Konvensional .91	
Gambar 4. 17 Grafik Pemilihan Tumbukan Benda Uji Modifikasi CR92	
Gambar 4. 18 Diagram Nilai Kekuatan Tarik ITS Dry 0% CR & 10% CR	94
Gambar 4. 19 Diagram Nilai Derajat Kejenuhan (S') 0% CR &10% CR	97

Gambar 4. 20 Diagram Nilai Kekuatan Tarik ITS Wet 0% CR & 10% CR.....	99
Gambar 4. 21 Diagram Nilai Rasio Pengujian ITS 0% CR &10% CR	100
Gambar 4. 22 Keserasian Peningkatan Nilai Kuat Tarik dan Stabilitas	101

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan raya merupakan suatu moda transportasi utama yang sangat berperan penting dalam kehidupan masyarakat, dimana jalan raya memiliki fungsi dalam mendorong distribusi barang sekaligus jasa bagi masyarakat (Tesis Leily I-IV, 2013). Di Indonesia sendiri terdapat tiga bidang transportasi yang tersedia yaitu transportasi air, transportasi udara dan transportasi darat dimana moda transportasi yang paling banyak memiliki peminat tertinggi ialah moda transportasi darat. Maka dari itu diperlukan perencanaan struktur yang kuat, tahan lama dan juga mempunyai daya tahan tinggi dalam menahan deformasi yang terjadi pada suatu perkerasan jalan raya.

Lapis tipis aspal beton (Lataston) atau bisa juga disebut *Hot Rolled Sheet (HRS)* merupakan salah satu lapisan perkerasan jalan raya yang digunakan pada jalan dengan beban lalu lintas yang sedang. *HRS* terdiri dari 2 campuran (Boedi Rahardjo, 2017), yaitu *HRS* yang digunakan sebagai lapis aus (*HRS-WC*) dan *HRS* untuk lapis pondasi (*HRS-BC*), dimana *HRS-WC* adalah lapis perkerasan yang bersinggungan langsung dengan roda kendaraan dan cuaca. Selain itu, lapis permukaan harus dapat mencegah masuknya air agar campuran tetap memiliki daya dukung yang baik. Meningkatkan kualitas dari campuran lapisan permukaan jalan merupakan salah satu solusinya, karena lapisan permukaan jalan adalah lapisan yang pertama kali yang menanggung beban terberat dari lalu lintas yang terjadi. Dan salah satu solusi untuk meningkatkan kualitas dari lapisan permukaan jalan adalah dengan penggunaan modifikasi *Crumb Rubber* pada campuran perkerasan jalan.

Penggunaan modifikasi *crumb rubber* dalam campuran perkerasan jalan memiliki nilai fleksibilitas dan durabilitas yang lebih baik dari campuran perkerasan konvensional (Purnomo et al., 2014). Selain itu, *crumb rubber* juga dapat meningkatkan nilai mekanik serta fisik dari campuran aspal dan juga dapat menurunkan kerentanan terhadap suhu serta kerusakan akibat kelembapan terhadap campuran aspal (Siswanto et al., 2017). Penggunaan modifikasi *crumb rubber* dalam campuran aspal juga dapat meningkatkan kinerja keelastisan dari bahan pengikat atau

aspal serta performa campurannya dalam melawan kelelahan (Palit et al., 2004). Material yang pada umumnya digunakan dalam modifikasi *crumb rubber* adalah limbah ban bus, truk dan juga kendaraan *off – road*.

Dalam penggabungan *crumb rubber* ke dalam campuran aspal pada umumnya dilakukan melalui dua teknik utama yang berbeda salah satunya adalah “Proses Basah” dimana dalam proses ini *crumb rubber* ditambahkan kedalam campuran semen aspal untuk memodifikasi sifat fisik dan kimia dari semen aspal (Takallou, n.d.). “Proses Basah” sendiri dapat menghasilkan nilai volumetrik yang diinginkan, dimana ketika aspal ini dimodifikasi sifat-sifat yang dihasilkan akan ditransferkan ke campuran aspalnya, oleh karena itu ketika kekakuan dari aspal meningkat berkat adanya *crumb rubber*, kekakuan dari campuran aspal pun juga akan meningkat. Dimana hal ini memberikan ketahanan yang lebih tinggi terhadap *rutting* atau alur pada perkerasan jalan

Oleh karena itu penulis berinisiatif untuk melakukan penelitian pada pemanfaatan modifikasi *crumb rubber* dari limbah ban kendaraan pada campuran perkerasan Lataston Lapis Aus (*HRS-WC*), dengan kadar *crumb rubber* sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dari berat kadar aspal optimum dan dengan menggunakan proses pencampuran basah sebagai metode pencampurannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan modifikasi *Crumb Rubber* dari limbah ban kendaraan terhadap Karakteristik *Marshall* dan *Indirect Tensile Strength (ITS)* pada perkerasan Lataston Lapis Aus (*HRS-WC*). Sehingga diharapkan penambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari limbah kendaraan dapat meningkatkan kualitas perkerasan dari Lataston Lapis Aus (*HRS-WC*).

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana rancangan proporsi campuran *HRS-WC* dengan tambahan Modifikasi *Crumb Rubber*?
2. Bagaimana perbandingan hasil campuran *HRS-WC* tanpa penambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dengan campuran *HRS-WC* yang menggunakan penambahan Modifikasi *Crumb Rubber*?
3. Bagaimana presentase kadar Modifikasi *Crumb Rubber* yang paling optimum terhadap kinerja pada campuran *HRS-WC* ditinjau dari Karakteristik *Marshall* dan *Indirect Tensile Strength (ITS)*?

4. Bagaimana menganalisa dan mengevaluasi hasil proporsi campuran *HRS-WC* dengan tambahan Modifikasi *Crumb Rubber* menggunakan metode basah?

1.3 Batasan Masalah

1. Jenis perkerasan berupa Lapisan Tipis Aspal Beton (LATASTON) tipe *HRS-WC*
2. Jenis Modifikasi *Crumb Rubber* yang digunakan berupa modifikasi *crumb rubber* dari limbah ban kendaraan yaitu jenis kendaraan berat seperti truk
3. Jenis aspal yang digunakan yakni aspal penetrasi 60/70
4. Kadar penambahan *crumb rubber* dengan variasi 5%, 10%, 15%, 20% dari berat rencana kadar aspal optimum
5. Penambahan *crumb rubber* ke dalam campuran aspal menggunakan proses metode basah

1.4 Tujuan

1. Mengetahui rancangan proporsi campuran *HRS-WC* dengan tambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan
2. Mengetahui hasil perbandingan campuran *HRS-WC* tanpa penambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan dengan campuran *HRS-WC* yang menggunakan penambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan
3. Mengetahui proporsi optimum dari campuran *HRS-WC* dengan tambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan ditinjau dari Karakteristik *Marshall* dan *Indirect Tensile Strength (ITS)*.
4. Mengetahui karakteristik dari campuran *HRS-WC* dengan tambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan

1.5 Manfaat

1. Memberikan informasi dan juga pembelajaran kepada penulis tentang penggunaan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan dalam bidang kosntruksi jalan.
2. Memberikan informasi dan juga pembelajaran kepada pembaca tentang penggunaan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan dalam bidang kosntruksi jalan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 LATASTON

2.1.1 Pengertian LATASTON

Lataston (Lapis Tipis Aspal Beton) atau bisa juga disebut *HRS* (*Hot Rolled Sheet*) merupakan salah satu lapis perkerasan jalan raya yang terdiri dari campuran aspal keras, agregat dengan gradasi timpang, dan bahan pengisi (*filler*) yang dicampurkan, dihamparkan, dan dipadatkan pada suhu dan kondisi tertentu dengan ketebalan antara 2,5 sampai 3cm (Silvia Sukirman, 1999). Direktorat Jendral Bina Marga (1996:27) menerangkan bahwa *HRS*/Lataston merupakan suatu lapisan permukaan konstruksi jalan yang sebaiknya memikul lau lintas ringan sampai sedang (< 1.000.000 ES A). Konstruksi perkerasan dengan *HRS* terdiri dari 2 campuran, yaitu *HRS* yang digunakan sebagai lapis aus (*HRS-WC*) dan *HRS* untuk lapis pondasi (*HRS-Base*) dan ukuran maksimum agregat masing-masing campuran adalah 19 mm. *HRS-Base* mempunyai proporsi fraksi agregat kasar lebih besar daripada *HRS-WC*.

Untuk mendapatkan hasil yang memuaskan, maka campuran harus dirancang sampai memenuhi semua ketentuan yang diberikan dalam spesifikasi. Menurut Bina Marga (2010), dua hal yang mempengaruhi campuran lataston yaitu:

- a. Gradasi yang benar-benar senjang. Gradasi senjang dapat diperoleh dengan mencampurkan pasir halus dengan agregat pecah mesin. Batas bahan bergradasi senjang pada lataston terletak diantara bahan yang lolos saringan No. 8 (2,36 mm) tetapi tertahan saringan No. 30 (0,600 mm), yang menggunakan suatu campuran agregat kasar dan agregat halus.
- b. Rongga udara pada kepadatan membal (*refusal density*) harus memenuhi ketentuan yang ditunjukkan oleh pedoman.

Berdasarkan PU Bina Marga, Spesifikasi Umum 2018 seksi 6.3.1 ayat 4 adapun ketentuan dalam tebal nominal minimum campuran beraspal adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Tebal Nominal Campuran Beraspal

Jenis Campuran		Simbol	Tebal Nominal Minimum (cm)
<i>Stone Matrix Asphalt</i> Tipis		SMA Tipis	3,0
<i>Stone Matrix Asphalt</i> - Halus		SMA - Halus	4,0
<i>Stone Matrix Asphalt</i> - Kasar		SMA - Kasar	5,0
Lataston	Lapis Aus	HRS - WC	3,0
	Lapis Fondasi	HRS - Base	3,5
Laston	Lapis Aus	AC - WC	4,0
	Lapis Antara	AC - BC	6,0
	Lapis Fondasi	AC - Base	7,5

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.1.2 Spesifikasi LATASTON

Berdasarkan PU Bina Marga, spesifikasi umum 2018, adapun ketentuan sifat-sifat campuran Lataston, lihat Tabel 2.2:

Tabel 2. 2 Ketentuan sifat - sifat campuran Lataston (HRS)

Sifat - sifat Campuran		Lataston	
		Lapis Aus	Lapis Fondasi
Kadar aspal efektif (%)	Min	5,9	5,5
Jumlah tumbukan per bidang		50	
Rongga dalam campuran (VIM) (%)	Min	4	
	Maks	6	
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min	18	17
Rongga Terisi Aspal (VFA) (%)	Min	68	
Stabilitas Marshall (kg)	Min	600	
Marshall Quotient (kg/mm)	Min	250	
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min	90	

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.2 Material Penyusun LATASTON

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Seksi 6.3.2 ayat 1, ketentuan dalam pemilihan agregat adalah sebagai berikut:

- a) Agregat yang digunakan dalam pekerjaan harus sedemikian rupa agar campuran beraspal memenuhi semua ketentuan yang disyaratkan untuk campuran LATASTON.
- b) Penyerapan air oleh agregat maksimum 3%.
- c) Berat jenis (specific gravity) agregat kasar dan halus tidak boleh berbeda lebih dari 0,2.

2.2.1 Agregat Kasar

Berdasarkan PU Bina Marga, spesifikasi umum 2018, adapun syarat-syarat penerimaan agregat kasar, lihat di Tabel 2.3:

Tabel 2. 3 Ketentuan Agregat Kasar

Penguujian		Metode Penguujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan	natrium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12%
	magnesium sulfat		Maks. 18%
Abrasi dengan mesin Los Angeles	Campuran AC Modifikasi dan SMA	100 putaran	Maks. 6%
		500 putaran	Maks. 30%
	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	100 putaran	Maks. 8%
		500 putaran	Maks. 4%
Kelelahan agregat terhadap aspal		SNI 2439:2011	Min. 95%
Butir Pecah pada Agregat Kasar	SMA	SNI 7619:2012	100/90
	Lainnya		95/90
Partikel Pipih dan Lonjong	SMA	ASTM D4791-10 Perbandingan 1: 5	Maks. 5%
	Lainnya		Maks. 10%
Material lolos Ayakan No.200		SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.2.2 Agregat Halus

Adapun ketentuan-ketentuan untuk agregat halus berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 terdapat pada Tabel 2.4:

Tabel 2. 4 Ketentuan Agregat Halus

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

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.2.3 Spesifikasi Agregat Gabungan

Berdasarkan PU Bina Marga, Spesifikasi Umum 2018 Seksi 6.3.2 pasal 5, Gradasi agregat gabungan untuk campuran aspal ditunjukkan dalam persen terhadap berat agregat dan bahan pengisi yang harus memenuhi batas-batas yang diberikan, lihat **Tabel 2.5**:

Tabel 2. 5 Spesifikasi Gradasi Agregat Gabungan

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos terhadap Total Agregat	
		Lataston (HRS)	
ASTM	(mm)	HRS - WC	HRS - Base
1 1/2	37,5		
1	25		
3/4	19	100	100
1/2	12,5	90 - 100	90 - 100
3/8	9,5	75 - 85	65 - 90
No.4	4,75		
No.8	2,36	50 - 75	35 - 35
No.16	1,18		
No.30	0,6	35 - 60	15 - 35
No.50	0,3		
No.100	0,15		
No.200	0,075	6 - 10	2 - 9

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

Tabel 2. 6 Contoh Batas - batas "Bahan Bergradasi Senjang"

Ukuran Ayakan	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3	Alternatif 4
%Lolos No.8	40	50	60	70
%Lolos No.30	Paling sedikit 32	Paling sedikit 40	Paling sedikit 48	Paling sedikit 56
%Kesenjangan	8 atau kurang	10 atau kurang	12 atau kurang	14 atau kurang

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.2.4 Bahan Aspal untuk Campuran Beraspal

Adapun ketentuan aspal keras untuk pengujian campuran aspal panas berdasarkan Spesifikasi Umum Binamarga 2018 Seksi 6.3.2, Lihat Tabel 2.6:

Tabel 2. 7 Ketentuan untuk Aspal Keras

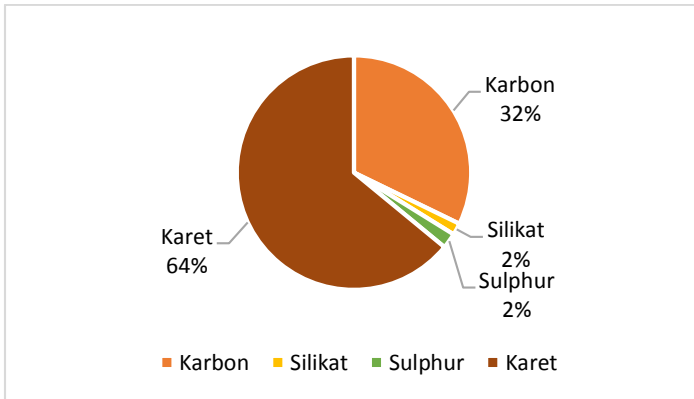
No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen. 60 - 70	Tipe II Aspal Modifikasi	
				Elastomer Sintetis	
				PG70	PG76
1	Penetrasi pada 25 °C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60 - 70	Dilaporkan	
2	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis (G*/sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≥ 1,0 kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-	70	76
3	Viskositas Kinematis 135°C (cSt)	ASTM D2170-10	≥ 300	≤ 3000	
4	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48	Dilaporkan	
5	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2434:2011	≥ 100	-	
6	Titik Nyala (°C)	SNI 2434:2011	≥ 232	≥ 230	
7	Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-14	≥ 99	≥ 99	
8	Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0	-	
9	Stabilitas Penyimpanan: Perbedaan Titik Lembek (°C)	ASTM D 5976-00 Part 6.1 dan SNI 2434:2011	-	≤ 2,2	

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen. 60 - 70	Tipe II Aspal Modifikasi	
				Elastomer Sintetis	
				PG70	PG76
10	Kadar Parafin Lilin (%)	SNI 03-3639-2002	≤ 2		
Pengujian Residu hasil TFOT (SNI-06-2440-1991) atau RTFOT (SNI-036835-2002) :					
11	Berat yang Hilang (%)	SNI 06-2441-1991	≤ 0,8	≤ 0,8	
12	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis ($G^*/\sin\delta$) pada osilasi 10 rad/detik $\geq 2,2$ kPa, ($^{\circ}\text{C}$)	SNI 06-6442-2000	-	70	76
13	Penetrasi pada 25 $^{\circ}\text{C}$ (% semula)	SNI 2456:2011	≥ 54	≥ 54	≥ 54
14	Daktalitas pada 25 $^{\circ}\text{C}$, (cm)	SNI 2432:2011	≥ 50	≥ 50	≥ 25
Residu aspal segar setelah PAV (SNI 03-6837-2002) pada temperatur 100$^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 2,1 Mpa					
15	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis ($G^*/\sin\delta$) pada osilasi 10 rad/detik ≤ 5000 kPa, ($^{\circ}\text{C}$)	SNI 06-6442-2000	-	31	34

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.3 Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan

Crumb Rubber merupakan salah satu jenis polimer elastomer yang banyak terdapat di Indonesia dalam bentuk natural maupun daur ulang dan merupakan salah satu hasil dari pengolahan limbah ban bekas. Biasanya dalam industry pengolahan CR digunakan limbah ban bekas kendaraan berat seperti truck (muatan besar). Pada penelitian yang dilakukan Mashuri (2011), kandungan kimia *Crumb Rubber* memiliki unsur unsur penyusun yang ditampilkan pada Gambar berikut:



Gambar 2. 1 Grafik Unsur yang terkandung dalam Crumb Rubber
 Sumber: Mashuri (2011), *Pemanfaatan Material Limbah Pada Campuran Beton Aspal Campuran Panas.*

Pengolahan ban bekas bisa berupa *recycled rubber* dan *reclaimed rubber* (Adhikari & Maiti, 2000), dimana pengolahan (CR) melalui tahap peremahan hasil olahannya disebut *Crumb Rubber* (CR) atau juga bisa disebut “Karet Remah” (kemenperin.go.id). CR terdiri dari partikel ukuran 4,75 mm (saringan nomor 4) hingga ukuran kurang dari 0,075 mm (saringan nomor 200). Pada saat ini dalam mengolah ban bekas menjadi CR digunakan tiga metode yang biasa digunakan yaitu:

1. *Ambient process*

Ambient grinding dapat dilakukan dengan dua cara: granulasi atau *cracker mills*. Karet, ban atau bahan baku lainnya tetap pada suhu kamar saat memasuki *cracker mills* atau granulator. isah udara. CR yang dihasilkan dalam proses granulasi umumnya memiliki bentuk potongan dan tekstur kasar, dengan dimensi yang sama pada potongan pinggirnya. *Cracker mills* merupakan mesin berkecepatan rendah sekitar 30-50 rpm. Karet biasanya melewati 2-3 mills untuk mencapai berbagai ukuran yang diinginkan dan memisahkan baja dan komponen serat

2. *Cryogenic Process*

Cryogenic process merupakan proses pengecilan ukuran ban bekas dengan menambahkan cairan nitrogen atau material lain untuk membekukan ban atau *tire chips* (FHWA 2015). Proses ini menghasilkan

CR dengan ukuran 0,25-inch hingga 30 mesh, dengan kecepatan pemecahan sekitar 4.000- 6.000 pounds per jam

3. *Fine Grind - Ambient Method*

Fine grind-ambient Method atau penggilingan mikro merupakan teknologi pengolahan yang digunakan untuk menghasilkan CR dengan ukuran 40 mesh atau lebih kecil lagi. Keuntungan utama *Fine grind-ambient Method* adalah dapat membentuk CR ke ukuran hingga tertahan saringan nomor 200. CR yang dihasilkan cukup bersih dan ukuran yang konsisten.



Gambar 2. 2 Contoh Hasil Modifikasi *Crumb Rubber*

Sumber: <https://www.rerubber.com/product-listing-10-30-mesh-crumb-rubber/>

2.4 Perencanaan Kadar Aspal

Menghitung perkiraan awal kadar aspal optimum (Pb), berdasarkan rumus empiris pada pers. 2.1. berikut:

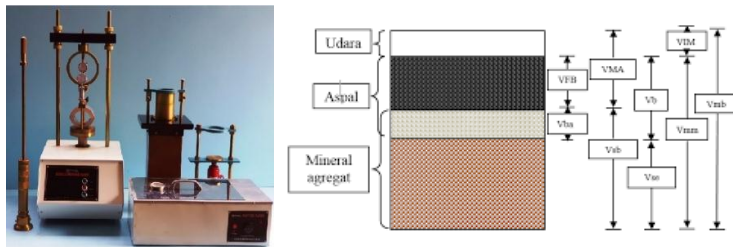
$$\mathbf{Pb = 0,035 (\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18(\% FF) + K} \quad (2. 1)$$

Keterangan:

- Pb : Kadar aspal tengah atau ideal, (persen terhadap berat campuran)
- CA : Persen agregat tertahan saringan No.8
- FA : Persen agregat lolos saringan No.8 dan tertahan saringan No.200
- FF : (*filler*), Persen agregat minimal 75% lolos saringan No.200
- K : Nilai konstanta (untuk nilai konstanta digunakan $\pm 0.5 - 1$ untuk Lataston)

2.5 Pengujian Marshall

Metode pengujian marshall ditemukan oleh *Bruce Marshall* yang telah di modifikasi oleh ASTM D 1559-76 atau AASHTO T-245-90. Pengujian marshall bertujuan untuk memeriksa stabilitas (ketahanan) dan kelelahan (*flow*) serta mengetahui karakteristik campuran aspal. Alat marshall merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan *proving ring* (cincin penguji) berkapasitas 22.2 KN dan flowmeter. *Proving ring* digunakan untuk mengukur nilai stabilitas, dan flowmeter untuk mengukur kelelahan plastis atau flow. Benda uji *marshall* berbentuk silinder berdiameter 10.2 cm dan tinggi 6.35 cm. Prosedur pengujian Marshall mengikuti SNI 06-2489-1991, atau AASHTO T 245-90, atau ASTM D 1559-76.



Gambar 2. 3 Alat Uji Marshall dan Volumetrik Campuran Beraspal

Sumber: <https://media.neliti.com/>

2.6 Parameter Pengujian Marshall

Pada penelitian ini, penambahan limbah karet ban dalam campuran aspal diharapkan dapat memenuhi parameter *marshall* yang meliputi:

a) Kerapatan Campuran (*Density*)

Densitas menunjukkan besarnya kepadatan pada campuran, faktor-faktor yang mempengaruhi density yaitu temperatur pemadatan, komposisi bahan penyusun, semakin bertambahnya kadar aspal semakin banyak rongga-rongga udara yang terisi aspal, sehingga kerapatan semakin tinggi.

Densitas diperoleh dari rumus sebagai berikut:

$$D = \frac{W_{dry}}{(W_s - W_w)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

D = Densitas / Berat Isi

Wdry = Berat Kering / Berat di udara (gr)

Ws = Berat SSD (gr)

Ww = Berat di dalam air (gr)

b) Rongga dalam Campuran/ Void in Mix (VIM)

Void In Mix adalah volume total udara yang berada di antara partikel agregat yang terselimuti aspal dalam suatu campuran yang telah didapatkan, dan dinyatakan dalam persen volume bulk. Nilai *VIM* berpengaruh terhadap keawetan dari campuran aspal agregat, semakin tinggi nilai *VIM* menunjukkan semakin besar rongga dalam campuran sehingga campuran bersifat porous.

Persamaan *VIM*:

$$VIM = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

VIM : Rongga udara dalam campuran, persen total campuran (%)

Gmm : Berat jenis maksimum campuran, rongga udara 0. (gr/cm^3)

Gmb : Berat jenis *bulk* campuran padat (gr/cm^3)

Untuk nilai syarat persen *VIM* ditentukan berdasarkan jenis lapisan permukaan yang dipilih misalnya untuk lapisan *Hot Rolled Sheet – Wearing Course (HRS-WC)* atau biasa dikenal dengan aspal beton nilainya antara 4 - 6 % persyaratan ini berdasarkan Bina Marga tahun, 2010.

c) Rongga dalam Agregat / Void in Mineral Aggregate (VMA)

Pengetian *VMA* berdasarkan Puslitbang, 2000 adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran yang telah dipadatkan, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji.

Agregat bergradasi menerus memberikan rongga antar butiran *VMA* yang kecil dan menghasilkan stabilitas yang tinggi tetapi

membutuhkan kadar aspal yang rendah untuk mengikat agregat. *VMA* yang kecil menyebabkan aspal menyelimuti agregat terbatas, sehingga menyebabkan terjadinya kerusakan. Nilai *VMA* akan meningkat seiring dengan bertambahnya selimut aspal atau agregat yang digunakan bergradasi terbuka.

Persamaan *VMA*:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} \times \frac{100}{(100 + pb)} \times 100 \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

VMA : Rongga diantara mineral agregat, persen volume *bulk*

Gsb : Berat jenis *bulk* agregat (*gr/cm*³)

Gmb : Berat jenis *bulk* campuran padat (*gr/cm*³)

Pb : Kadar aspal persen terhadap berat total campuran (%)

d) Rongga Terisi Campuran Beraspal / Void in Filled with Asphalt (VFA)

Menurut Puslitbang, 2000 pengertian *VFA* adalah bagian dari rongga yang berada diantara mineral agregat (*VMA*) yang terisi aspal efektif dinyatakan dalam persen. dan secara umum menurut Silvia Sukirman, 1999 Rongga terisi campuran aspal adalah persen rongga yang terdapat diantara partikel agregat *VMA* yang terisi oleh aspal, tetapi tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. Untuk mendapatkan nilai *VFA* ditentukan persamaan berikut:

$$VFA = \frac{100 (VMA - VIM)}{Gmm} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

VFA : Rongga terisi aspal (%)

VMA : Rongga diantara mineral (%)

VIM : Rongga udara campuran, persen total campuran (%)

Gmm : Berat jenis maksimum campuran.

Untuk nilai *VFA* yang disyaratkan oleh Bina Marga tahun 2010 minimum adalah 68% untuk campuran *HRS-WC*.

e) **Stabilitas Marshall**

Stabilitas adalah kemampuan lapis perkerasan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang (deformasi permanen), alur ataupun bleeding (keluarnya aspal ke permukaan). Stabilitas terjadi dari hasil geseran antar agregat, penguncian butir partikel (*interlock*) dan daya ikat yang baik dari lapisan aspal. Sehingga stabilitas yang tinggi dapat diperoleh dengan mengusahakan penggunaan:

- Agregat dengan gradasi yang rapat.
- Agregat dengan permukaan kasar.
- Agregat berbentuk kubikal.
- Aspal dengan penetrasi rendah.
- Aspal dalam jumlah yang mencukupi untuk ikatan antar butir.

Angka - angka stabilitas benda uji didapat dari pembacaan alat uji Marshall. Angka stabilitas ini masih harus dikoreksi lagi dengan kalibrasi alat dan ketebalan benda uji. Nilai stabilitas yang dihitung dengan pers. 2.6 berikut:

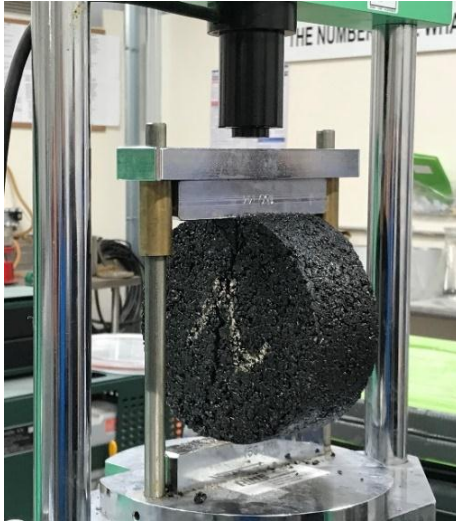
$$S = q \times k \times H \times 0,454 \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

- S = Stabilitas (kg)
 q = Pembacaan stabilitas alat (lb)
 k = Faktor kalibrasi alat
 H = Koreksi tebal benda uji
 0,454 = Konversi satuan dari (lb) ke (kg)

f) **Kelelehan (*Flow*)**

Flow adalah besarnya deformasi vertikal sampel yang terjadi mulai saat awal pembebanan sampai kondisi kestabilan maksimum sehingga sampel hancur, dinyatakan dalam satuan milimeter (mm). Pengukuran *flow* bersamaan dengan pengukuran nilai stabilitas Marshall. Nilai *flow* mengindikasikan campuran bersifat elastis dan lebih mampu mengikuti deformasi akibat beban.



Gambar 2. 4 Indirect Tensile Strength Test

Gaya tarik tidak langsung menggunakan benda uji yang berbentuk silindris yang mengalami pembebanan tekan dengan dua plat penekan yang menciptakan tegangan tarik yang tegak lurus sepanjang diameter benda uji sehingga menyebabkan pecahnya benda uji. Pengujian gaya tarik tidak langsung secara normal dilaksanakan menggunakan Marshall yang telah dimodifikasi dengan plat berbentuk cekung dengan lebar 12,5 mm pada bagian penekan Marshall. Pengukuran kekuatan tarik dihentikan apabila jarum pengukur pembebanan telah berbalik arah atau berlawanan dengan arah jarum jam.

Perhitungan gaya tarik tidak langsung menggunakan persamaan:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times h}$$

ITS : Nilai kuat tarik secara tidak langsung (N / mm²)

P : Nilai stabilitas (N)

h : Tinggi benda uji (mm)

d : Diameter benda uji (mm)

2.8 Parameter Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)

Pada penelitian ini, penambahan limbah karet ban dalam campuran aspal diharapkan dapat memenuhi parameter *Indirect Tensile Strength (ITS)* yang meliputi:

a) *ITS Dry*

Pengukuran kekuatan tarik pada kondisi kering dilakukan pada suhu 25⁰ C. Pengujian dihentikan jika jarum pembebanan telah berbalik arah. Kemudian, perhitungan dilakukan dengan rumus:

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dh}$$

Keterangan:

ITS : Nilai kuat tarik tidak langsung, (N/mm)

P : Gaya yang bekerja atau nilai stabilitas (N)

d : Diameter benda uji, (mm)

h : Ketebalan benda uji, (mm)

b) *ITS Wet*

Pengujian ITS Wet dilakukan untuk mengetahui kuat tarik spesimen dalam kondisi basah. Berbeda dengan ITS Dry yang langsung diuji pada kondisi kering, spesimen uji ITS Wet harus melewati proses perendaman dan vakum sebelum pengujian. Perhitungan kuat tarik dalam kondisi basah dilakukan dengan rumus yang sama pada kondisi kering.

c) *ITS Ratio*

Rasio kuat tarik tak langsung atau ITS Ratio dihitung dengan perbandingan ITS dry dan wet. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui ketahanan spesimen terhadap kerusakan yang diakibatkan aliran air.

$$ITSR = \frac{ITS\ dry}{ITS\ wet}$$

Keterangan:

ITSR : Rasio kuat tarik tak langsung

ITS dry : Kuat tarik tak langsung kering, (kN/mm²)

ITS wet : Kuat tarik tak langsung basah, (kN/mm²)

2.9 Review Jurnal

Referensi jurnal yang berkaitan dengan topik tugas akhir yang dikerjakan yaitu sebagai berikut:

Tabel 2. 8 Tabel Review Jurnal

No	Judul	Penyusun	Pembahasan
1	<i>Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process</i>	Weidong Cao	<i>Tests of three types of asphalt mixtures containing different rubber content (1%, 2% and 3% by weight of total mix) and a control mixture without rubber with rutting tests, indirect tensile tests and variance analysis using dry process</i>
2	<i>Marshall Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course Using Crumb Rubber Modified of Motorcycle Tire Waste as Additive</i>	Pria Rizky Chandra, Henri Siswanto	<i>Test of adding Crumb Rubber from Motorcycles Tire Waste (CRM-MTW) on asphalt concrete wearing course mix and this research based on Marshall Parameters</i>
3	<i>Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes</i>	S. K. Palit, K. Sudhakar Reddy, B. B. Pandey	<i>The details of various investigations conducted for the laboratory evaluation of the performance of crumb-rubber modified asphalt mixes. Crumb rubber (CR) obtained from discarded truck and bus tires was used to modify 80/100 penetration grade asphalt cement.</i>
4	<i>Laboratory Study of the Use of Additional Reacted and Activated Rubber (RAR) Materials on Asphalt Concrete-Wearing Course (ACWC) Mix</i>	Bayu Tirta Leksana Purnomo, Latif Budi Suparman, Agus Taufik Mulyono	<i>The use of added materials to Hot Mix Asphalt, the added materials are to enhance Reacted and Activated Rubber (RAR) which was a developed crumb rubber</i>
5	<i>Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture</i>	Paravita Sri Wulandari, Daniel Tjandra	<i>the effect of adding crumb rubber to asphalt mixture using wet process with two different crumb rubber content (1% and 2% by weight of asphalt mixture) and two different crumb rubber sizes (#40 and #80)</i>

Sumber: Review Jurnal

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian pemanfaatan Modifikasi Crumb Rubber dari Limbah Ban Kendaraan sebagai material aditif atau modifikasi pada campuran aspal telah banyak dilakukan sebelumnya. Berikut uraian penelitian terdahulu:

1. Karakteristik Marshall dan Stiffness Modulus pada Lapis Tipis Campuran Aspal Panas dengan Penambahan Crumb Rubber (Pratama Ilyas et al., 2019)

- Variasi penambahan crumb rubber sebesar 0%, 0,5%, 1,0% dan 1,5% dari berat total campuran.
- Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70

Hasil yang didapat:

1. Umum

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kadar aspal optimum yaitu untuk masing-masing kadar crumb rubber 0%, 0,5%, 1,0% dan 1,5% yaitu 5,41%, 5,50%, 5,39% dan 5,52%. Thin surfacing hot mix asphalt dengan penambahan crumb rubber 1% menurunkan nilai Kadar Aspal Optimum sebesar 0,4% dan meningkatkan nilai stabilitas sebesar 2% dibandingkan dengan thin surfacing hot mix asphalt tanpa penambahan crumb rubber 1%.

2. Data

- Hasil Uji Marshall

Tabel 2. 9 Hasil Pengujian Marshall.

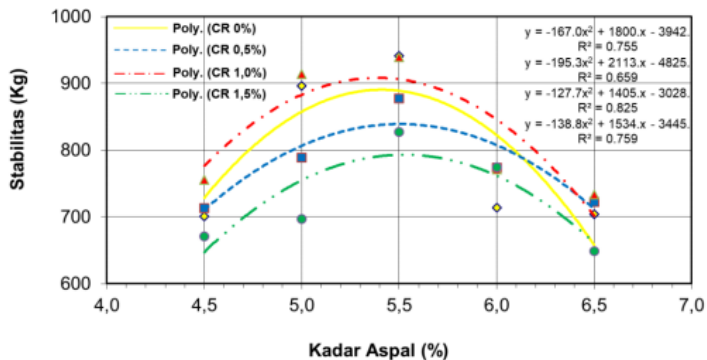
Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Pori (%)	Flow (mm)	Bulk Density (gr/cm)	Marshall Quotient (kg/mm)	Kadar CR (%)
4,5	670,692	5,063	2,633	2,23	300,14	1,50
5,0	696,810	3,437	2,533	2,35	310,53	1,50
5,5	826,851	3,353	2,433	2,24	317,72	1,50
6,0	774,450	3,133	2,400	2,23	254,72	1,50
6,5	648,750	3,219	2,167	2,21	274,67	1,50
4,5	755,670	6,196	2,530	2,21	309,98	1,00
5,0	913,460	5,205	2,500	2,22	376,91	1,00

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	Pori (%)	Flow (mm)	Bulk Density (gr/cm)	Marshall Quotient (kg/mm)	Kadar CR (%)
5,5	939,361	4,393	2,500	2,23	417,07	1,00
6,0	771,088	3,352	2,900	2,24	266,54	1,00
6,5	733,590	3,344	2,933	2,22	255,27	1,00
4,5	713,059	5,884	2,400	2,24	300,14	0,50
5,0	788,838	4,288	2,667	2,26	310,53	0,50
5,5	877,449	3,928	2,767	2,25	317,72	0,50
6,0	774,028	3,517	3,100	2,25	254,72	0,50
6,5	722,299	2,995	2,833	2,24	274,67	0,50
4,5	700,672	7,525	2,193	2,21	319,52	0,00
5,0	896,402	5,603	2,367	2,24	385,33	0,00
5,5	941,026	4,580	2,533	2,25	373,56	0,00
6,0	714,000	4,666	2,500	2,23	291,51	0,00
6,5	703,733	3,596	2,533	2,24	288,55	0,00

Sumber: (Pratama Ilyas et al., 2019)

- Stabilitas

Dari hasil tabel di atas, hubungan antara kadar aspal dengan stabilitas ditunjukkan dalam gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Grafik Hubungan Kadar aspal dengan Stabilitas

Sumber: (Pratama Ilyas et al., 2019)

Dari aspal tanpa penambahan CR didapatkan kadar aspal optimum sebesar 5,41% dengan nilai stabilitas sebesar 941,026kg, sedangkan untuk aspal dengan penambahan CR 1% didapatkan kadar aspal optimum sebesar 5,39% dengan nilai stabilitas 939,361kg

2. Pemanfaatan Crumb Rubber (Tyre Rubber) sebagai Aditif pada Aspal Modifikasi Polimer (Purnomo et al., 2014)

- Ukuran crumb rubber yang digunakan sebagai aditif adalah lolos saringan No.200
- Dengan kadar Crumb Rubber (CR) sebesar: 5%, 10%, 12%
- Menggunakan metode pencampuran putaran tinggi

Hasil yang di dapat:

1. Umum

Hasil pengujian sifat aspal menunjukkan meningkatnya nilai penetrasi, titik lembek, dan viskositas yang merupakan interpretasi kemampuan dalam menahan beban, suhu tinggi, dan suhu rendah. Crumb Rubber (CR) dapat digunakan sebagai aditif aspal modifikasi polimer memiliki sifat aspal dan campuran perkerasan yang lebih baik dari aspal dan campuran konvensional dengan nilai optimum yang dapat digunakan dalam aspal modifikasi polimer adalah antara 5 % dan 10 %.

2. Data

- Hasil Pengujian Aspal Modifikasi Polimer dengan Crumb Rubber

Tabel 2. 10 Hasil Pengujian Aspal Modifikasi Polimer dengan Crumb Rubber

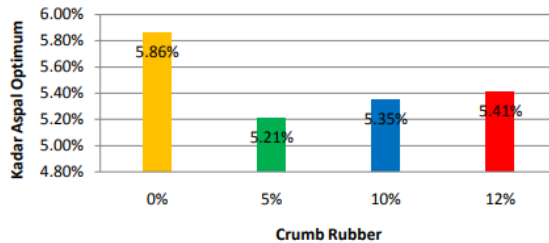
Jenis Pengujian		Nilai Persyaratan*	Hasil Pengujian			
			Pen 60/70	CR 5%	CR 10%	CR12%
Titik Lembek	°C	52 – 72	49,25	53,75	55,75	54,5
Viskositas 135 °C	cSt	≤ 2000	346	2161	2354	1871
Penetrasi 25 °C	mm	≥ 40	60,6	56,6	67,4	79,6
Kehilangan Berat	%	≤ 0,8	0,048	0,027	0,034	0,038
Penurunan Penetrasi	%	≤ 40	4,95	2,47	9,20	2,51
Berat jenis	gr/cm ³	≥ 1,0	1,039	1,069	1,062	1,053

Sumber: (Purnomo et al., 2014)

Dari penambahan *crumb rubber* sebagai aditif aspal Pen 60/70 dengan kadar sebesar 5 %, 10 %, dan 12 %, dapat diperoleh

hasil bahwa *crumb rubber* dapat meningkatkan sifat aspal Pen 60/70, hal tersebut ditunjukkan dengan meningkatnya nilai penetrasi sebagai interpretasi kekerasan aspal dalam menahan beban pada suhu rendah. Selain itu, titik lembek meningkat sebagai interpretasi kemampuan aspal mendukung beban terhadap suhu tinggi perkerasan. Viskositas yang meningkat dapat meningkatkan kekentalan yang terkait dengan daya lekat dan daya dukung aspal terhadap suhu dan beban.

- Perancangan Campuran Rencana dan Pengujian Penentuan KAO



Gambar 2. 6 Kadar aspal optimum (KAO) berdasarkan persentase crumb rubber dalam aspal

Sumber: (Purnomo et al., 2014)

Aspal modifikasi polimer yang menggunakan *crumb rubber* sebagai aditif, memiliki nilai KAO yang lebih rendah dari aspal Pen 60/70, tetapi semakin tinggi kadar *crumb rubber* sebanding dengan meningkatnya kebutuhan aspal dalam campuran. Kadar aspal modifikasi polimer lebih rendah dari aspal Pen 60/70 mengindikasikan bahwa volume kebutuhan aspal berkurang atau lebih sedikit dari campuran perkerasan aspal konvensional. Hal ini, dapat mengurangi kebutuhan aspal campuran dan menghemat pengeluaran aspal (menurunkan harga campuran).

- Perbandingan Nilai Karakteristik Marshall, Kehilangan Berat dan Kuat Tarik

Tabel 2. 11 Perbandingan Nilai Karakteristik Marshall, Kehilangan Berat dan Kuat Tarik

Pengujian		Persyaratan	Persentase <i>Crumb Rubber</i>			
			Kontrol	5%	10%	12%
KAO	%	≥ 4,0	5,86	5,21	5,35	5,41
VITM	%	3,5 - 5,5	4,76	3,67	5,63	4,58
VMA	%	≥ 14	16,66	16,62	16,14	15,69
VFA	%	≥ 63	69,17	70,34	65,8	66,05
Stabilias 30	kg	1000	1229	1766,54	1730,02	1664,51
Stabilias 24	kg	-	1161	1530,02	1522,72	1502,84
Stabilitas Sisa	%	80	94,47	86,61	88,02	90,29
Pelelehan	mm	≥ 3,0	4,17	4,6	4,8	4,89
MQ	kg/mm	300	294,72	384,03	360,42	340,39
Berat Jenis	gr/cm ³	-	2,36	2,30	2,26	2,28

Sumber: (Purnomo et al., 2014)

Berdasarkan hasil dan pembahasan, *crumb rubber* sebagai aditif aspal modifikasi polimer memiliki sifat aspal yang lebih baik dari aspal Pen 60/70, serta karakteristik *Marshall* yang baik dan lebih baik dari campuran laston yang ditunjukkan pada Tabel 2.9. Pada pelaksanaan di lapangan sebaiknya menggunakan *crumb rubber* aditif aspal modifikasi polimer dengan persentase antara 5 % hingga 10 %.

3. *Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture* (Wulandari & Tjandra, 2017)

- Dalam penelitian ini, menggunakan dua jenis kandungan *crumb rubber* yang berbeda yakni sebesar 1% dan 2% dari berat campuran aspal
- Dan menggunakan dua ukuran karet remah yang berbeda yakni lolos saringan # 40 dan # 80
- Penambahan *crumb rubber* ke dalam campuran aspal menggunakan proses metode basah

Hasil yang didapat:

1. Umum

Dalam studi ini, dua kandungan *crumb rubber* yang berbeda digunakan yakni sebesar 1% dan 2% dari berat campuran aspal dan dua ukuran *crumb rubber* lolos ayakan # 40 dan # 80 telah diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *crumb rubber* direkomendasikan sebagai bahan aditif campuran aspal, karena

semua hasil pengujian memenuhi persyaratan standar. Penambahan *crumb rubber* cenderung meningkatkan kekuatan dan kualitas campuran aspal.

2. Data

- Sifat Fisik Aspal

Tabel 2. 12 Sifat Fisik Aspal Penetrasi 60/70

Asphalt Properties	Standard Test Method	Standard Requirements	Test Results
			(Asphalt 60-70)
Penetration at 25°C, dmm	SNI 06-2456-1991	60-70	64.3
Ductility at 25°C, cm	SNI 06-2432-1991	≥ 100	105
Softening Point, °C	SNI 06-2434-1991	≥ 48	52.2
Specific gravity	SNI 06-2441-1991	>1.0	1.03
Flash Point, °C	SNI 06-2433-1991	≥ 232	340

Sumber: (Wulandari & Tjandra, 2017)

Tabel 2. 13 Sifat Fisik Aspal Modifikasi *Crumb Rubber*

Asphalt Properties	Standard Test Method	Standard Requirements (Modified Asphalt)	Test Results (Crumb rubber size #40)		Test Results (Crumb rubber size #40)	
			1%	2%	1%	2%
Penetration at 25°C, dmm	SNI 06-2456-1991	Min. 40	41.33	44.00	43.80	41.50
Ductility at 25°C, cm	SNI 06-2432-1991	≥ 100	111	25	98	54
Softening Point, °C	SNI 06-2434-1991	≥ 54	54.06	57.96	57.35	65.35
Specific gravity	SNI 06-2441-1991	>1.0	1.033	1.033	1.033	1.033
Flash Point, °C	SNI 06-2433-1991	≥ 232	334	345	345	350

Sumber: (Wulandari & Tjandra, 2017)

Diketahui bahwa kandungan *crumb rubber* sangat berpengaruh dalam mereduksi penetrasi dan daktilitas aspal, jika tidak, pelunakan meningkat. Penetrasi yang lebih rendah dan titik pelunakan yang lebih tinggi pada campuran modifikasi aspal *crumb rubber* menunjukkan bahwa *crumb rubber* membuat aspal lebih kaku, tetapi juga mengurangi sifat fleksibilitas modifikasi aspal. Dan daktilitas yang lebih rendah menunjukkan bahwa aspal memiliki sifat perekat yang kurang baik. Proses pencampuran manual berpengaruh pada interaksi fisik dari aspal dan *crumb rubber*.

- Hasil Uji Marshall

Tabel 2. 14 Perbandingan hasil Uji *Marshall* pada seluruh campuran aspal

Type of asphalt mixture	Unmodified asphalt	Crumb rubber modified asphalt mixtures (#40)		Crumb rubber modified asphalt mixtures (#80)		Standard requirements (SNI 8198:2015)
		1%	2%	1%	2%	
Marshall Stability (kg)	1033.35	1210.10	1228.38	1393.53	1418.50	Min 800 (for unmodified asphalt concrete mixtures) Min 1000 (for modified asphalt concrete mixtures)
Flow (mm)	3.56	3.56	3.22	3.56	3.30	3-4.5
Marshall Quotient (kg/mm)	290.62	340.58	382.39	398.71	430.32	Min 250 (for unmodified asphalt concrete mixtures) Min 300 (for modified asphalt concrete mixtures)
VFB (%)	79.11	77.45	74.66	76.03	75.69	Min 65 3-5 (for unmodified asphalt concrete mixtures)
VIM (%)	3.71	3.76	4.25	3.74	3.81	3-5.5 (for modified asphalt concrete mixtures)
VMA (%)	17.78	16.63	16.74	15.60	15.66	Min 15

Sumber: (Wulandari & Tjandra, 2017)

Dari hasil uji *Marshall*, kandungan *crumb rubber* yang semakin tinggi dan yang semakin bertekstur halus dapat menyebabkan peningkatan Stabilitas *Marshall* dan *Marshall Quotient*. Dan sebaliknya, tetapi penambahan *crumb rubber* dapat menurunkan parameter *flow*.

Semakin tinggi nilai dari *Marshall Quotient* menunjukkan bahwa campuran aspal memiliki kekakuan dan kekuatan lebih terhadap keretakan, maka campuran aspal memiliki ketahanan yang lebih terhadap deformasi permanen. Hal tersebut jika ditunjukkan, untuk kadar *crumb rubber* yang tinggi, nilai *flow* cenderung menurun. Nilai *flow* yang menurun mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketidakcukupan kandungan aspal dan menjadi semakin kaku.

Selain itu juga terlihat penambahan *crumb rubber* menurunkan nilai *Voids Filled with Bitumen (VFB)*. Penurunan nilai (*VFB*) mengindikasikan penurunan keefektifan tebal film aspal, yang menghasilkan daya tahan campuran aspal yang lebih rendah.

Void in Mixture (VIM) cenderung meningkat pada kandungan *crumb rubber* yang tinggi tetapi nilai akan menurun

jika pada *crumb rubber* yang halus. Kadar rongga udara yang lebih tinggi akan menurunkan kadar aspal dalam campuran.

Penambahan *crumb rubber* menurunkan nilai *Void in Mineral aggregate (VMA)*. Bahwa *crumb rubber* yang halus menyebabkan penurunan pada *VMA*, semakin rendah *VMA* mengindikasikan semakin sedikit ruang yang tersedia untuk film aspal. Namun, campuran aspal yang tahan lama membutuhkan ketebalan aspal yang memadai

Tabel 2. 15 Resume Penelitian Terdahulu

No	Tahun	Peneliti	Judul	Material	Fungsi	Metode	Volume	Hasil
1	2019	Maulana Andhika Pratama Ilyas	Karakteristik Marshall dan Stiffness Modulus pada Lapis Tipis Campuran Aspal Panas dengan Penambahan Crumb Rubber	Crumb Rubber	Campuran	-	variasi crumb rubber sebesar 0%, 0,5%, 1,0% dan 1,5% dari berat total campuran	1. Penambahan crumb rubber 1% menurunkan nilai KAO sebesar 0,4% dan meningkatkan nilai stabilitas sebesar 2%
								2. Aspal tanpa penambahan CR didapatkan kadar aspal optimum sebesar 5,41% dengan nilai stabilitas sebesar 941,026kg,
								3. Sedangkan untuk aspal dengan penambahan CR 1% didapatkan kadar aspal optimum sebesar 5,39%

No	Tahun	Peneliti	Judul	Material	Fungsi	Metode	Volume	Hasil
								dengan nilai stabilitas 939,361kg.
2	2014	(1) Wahyu Purnomo, (2) Berry Evaldo, (3) Latif Budi Suparma	Pemanfaatan Crumb Rubber (Tyre Rubber) sebagai Aditif pada Aspal Modifikasi Polimer	Crumb Rubber (Tyre Rubber)	Aditif Aspal Modifikasi	Putaran Tinggi	Penambahan crumb rubber sebesar 5 %, 10 %, dan 12 %	1. Persentase crumb rubber yang memberikan hasil optimal adalah campuran dengan persentase crumb rubber sebesar 5 % hingga 10 %
								2. Nilai kadar aspal modifikasi polimer crumb rubber dalam campuran lebih rendah dari kadar aspal Pen 60/70, tetapi memiliki nilai stabilitas yang lebih tinggi
3	2017	(1) Paravita Sri Wulandari,	Use of crumb rubber as an additive in	Crumb Rubber	Aditif	Basah	1. Jenis kandungan crumb rubber	1. Crumb rubber direkomendasikan sebagai aditif dalam

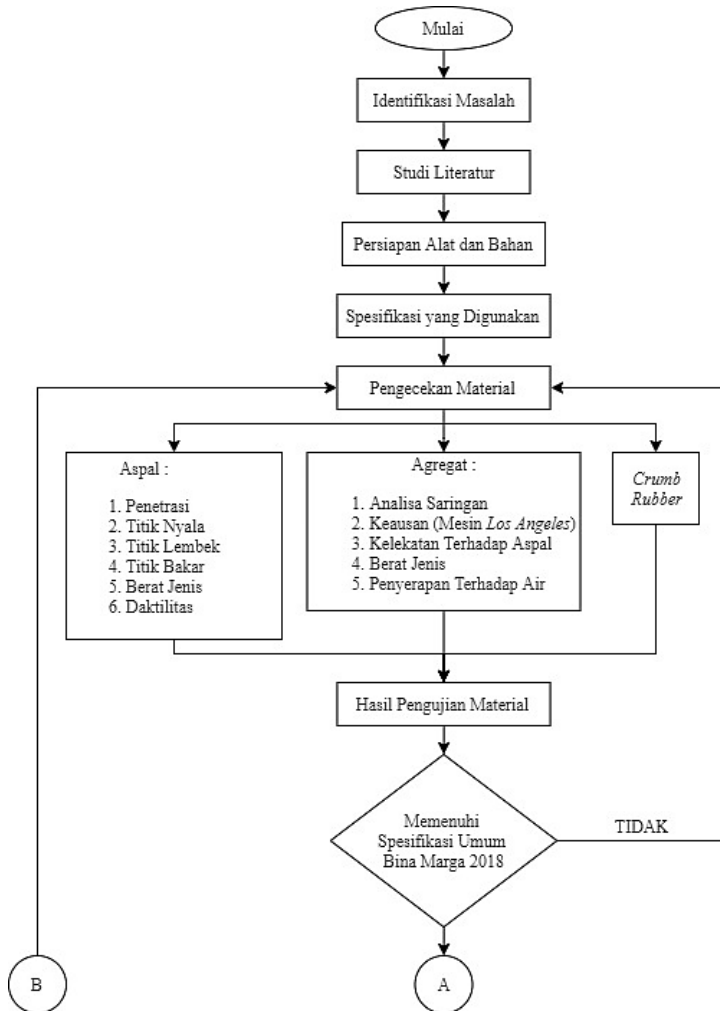
No	Tahun	Peneliti	Judul	Material	Fungsi	Metode	Volume	Hasil
		(2) Daniel Tjandra	asphalt concrete mixture				yakni sebesar 1% dan 2% dari berat campuran aspal	campuran aspal, karena hasil pengujiannya masuk kedalam persyaratan standar
								2. Crumb rubber cenderung meningkatkan kekuatan dan kualitas campuran aspal. Hal tersebut ditunjukkan dengan peningkatan stabilitas dan penurunan flow
							2. Ukuran karet remah yakni lolos saringan # 40 dan # 80	3. Campuran aspal modifikasi karet remah membutuhkan lebih sedikit kandungan aspal.

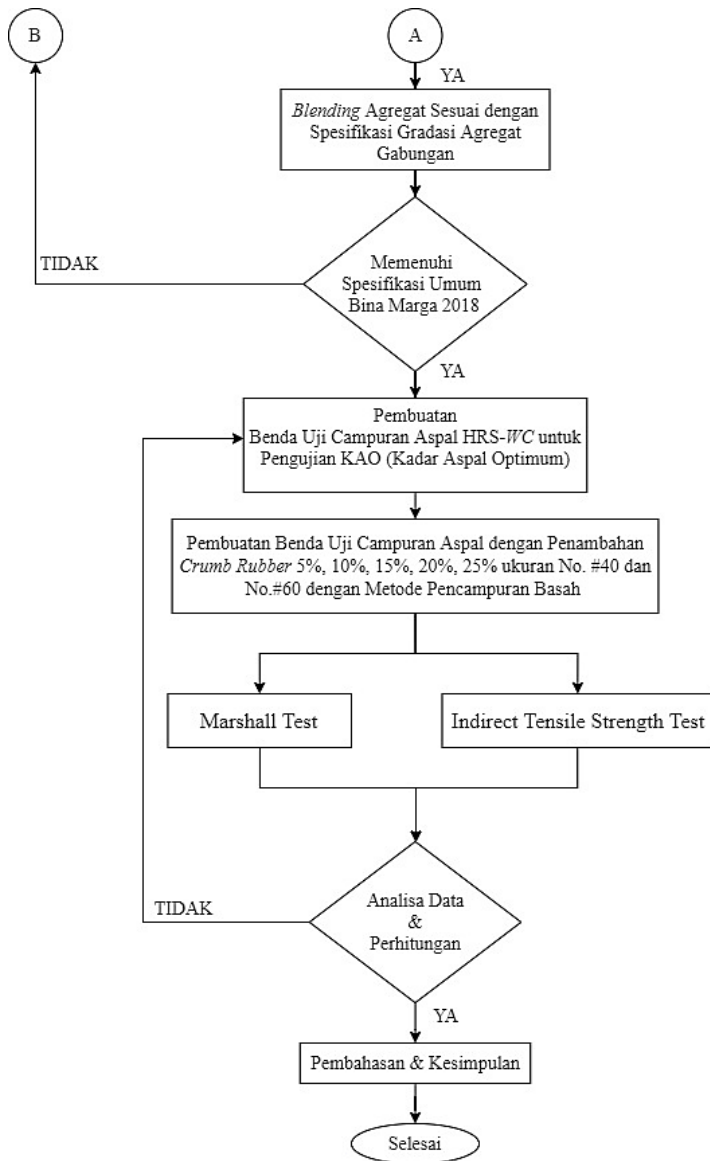
Sumber: Review Jurnal

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

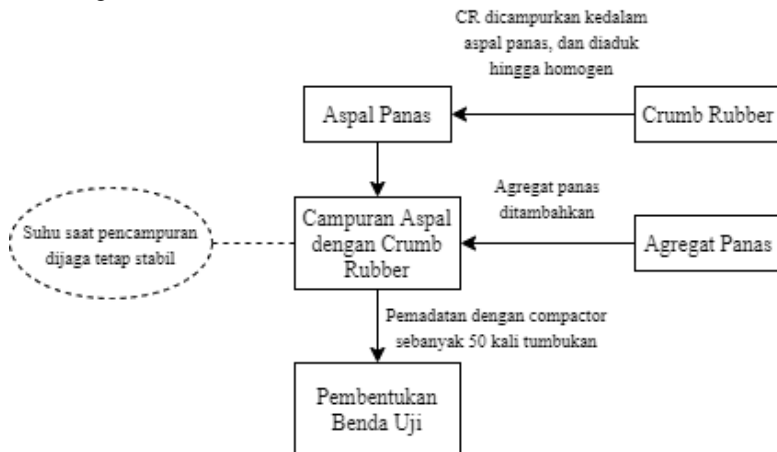




Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Proses Pencampuran dengan Metode Basah

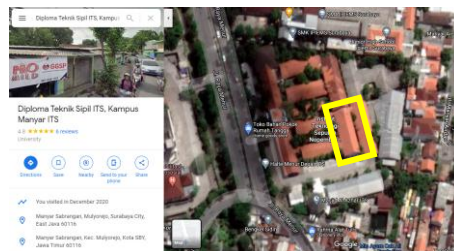
Pencampuran *Crumb Rubber* dengan aspal menggunakan metode *wet process* (metode basah). Cara pencampurannya ialah aspal yang telah dipanaskan hingga suhu yang sudah ditentukan (yang mana tidak melebihi nilai titik nyala dan titik bakar dari pengujian aspalnya, kemudian *crumb rubber* dicampurkan pada aspal dan di aduk hingga homogen.



Gambar 3. 2 Metode Pencampuran Basah

3.3 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Lab. Transportasi dan Geoteknik, Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.



Gambar 3. 3 Lokasi Penelitian

Sumber: <https://www.google.com/maps>

3.4 Persiapan Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut:

A. Peralatan

- 1) Satu Set Saringan (*Sieve*)
- 2) Alat Uji Aspal

Dalam pengujian aspal dibutuhkan alat uji yang meliputi:

- **Alat uji Penetrasi**
Alat yang digunakan dalam uji penetrasi meliputi cawan thermometer, penetrometer, dan jarum penetrasi
- **Alat Uji Titik Lembek**
Alat yang digunakan dalam uji titik lembek meliputi thermometer, cincin kuningan, bola baja (diameter 9,35 mm; berat 3,45 sampai 3,55 gram), alat pengarah bola, bejana gelas, dudukan benda uji, dan penjepit
- **Alat Uji Titik Nyala dan Titik Bakar**
Alat yang digunakan dalam uji titik nyala dan titik bakar meliputi thermometer, cleveland open cup, penjepit thermometer, kompor listrik, stopwatch, dan nyala penguji
- **Alat Uji Daktilitas**
Alat yang digunakan dalam uji daktilitas meliputi thermometer, cetakan kuningan, bak perendam, mesin uji yang dapat menjaga benda uji tetap terendam dan mampu menarik benda uji dengan kecepatan yang tetap, alat pemanas
- **Alat Uji Kehilangan Berat**
Alat yang digunakan dalam uji kehilangan berat meliputi cawan, oven, timbangan digital, dan thermometer

- 3) Alat Uji Agregat

Dalam pengujian agregat dibutuhkan alat uji yang meliputi:

- *Los Angeles Machine*
- *Marshall*
- Alat pengering, serta kelengkapan penimbangan dan juga peralatan penunjang penelitian seperti: (a) Wajan Penggorengan; (b) Kompor

Pemanas; (c) Thermometer; (d) Sendok/Pengaduk; (e) Sarung Tangan; (f) Kain Lap; (g) Timbangan; (h) Ember

B. Material

1. Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan *Crumb Rubber* yang dipakai nantinya diperoleh dari Pura Rubber dari PT. Pura Agung dengan ukuran tertahan saringan No.100 dengan harga jual Rp. 5000/kg



Gambar 3. 4 Modifikasi Crumb Rubber (Mesh 40) dan (Mesh 60)

Sumber: <https://www.indiamart.com/>

2. Agregat Kasar dan Agregat Halus
3. Aspal Penetrasi 60/70

Tabel 3. 1 Lokasi sumber material untuk penelitian

No	Material	Lokasi
1	<i>Crumb Rubber</i>	Pura Rubber dari PT. Pura Agung, Mojokerto
2	Agregat	PT. Calvary Abadi, Kec. Gondang Mojokerto
3	Aspal	PT. Bumindo Sakti, Kec. Driyorejo, Gresik

3.5 Pengecekan Material

A. Aspal Pen. 60/70

Aspal yang akan digunakan yakni aspal penetrasi 60/70, aspal ini kemudian akan di uji untuk mengetahui apakah aspal tersebut memenuhi spesifikasi atau tidak. Jenis pengujian aspal yang akan dilakukan yakni:

Tabel 3. 2 Pengecekan Material Aspal Pen. 60/70

Pengujian Aspal Pen. 60/70		
No	Jenis Pengujian	Spesifikasi yang digunakan
1	Penetrasi	(ASTM D5-06, 2006)
2	Titik Lembek	(ASTM D3461-97, 2002)
3	Titik Nyala	(ASTM D92-12, 2012)
4	Daktilitas	(ASTM D113-07, 2012)
5	Berat Jenis	(ASTM D1188-96, 2002)

Sumber: Peraturan Terkait

B. Agregat

Agregat pada campuran aspal sangat diperlukan sebagai bahan pengisi, dan agregat dibedakan menjadi beberapa macam berdasarkan diameter butirannya yakni agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Diperlukan beberapa pengujian terhadap agregat untuk mengetahui apakah material sudah memenuhi spesifikasi atau tidak, jenis pengujian agregat yang dilakukan meliputi:

Tabel 3. 3 Pengecekan Material Agregat

Pengujian Agregat		
No	Jenis Pengujian	Spesifikasi yang digunakan
1	Analisa Saringan	(ASTM D D448-03a, 2012)
2	Keausan	(ASTM D6928-03, 2003)
3	Berat Jenis dan Penyerapan	(ASTM D2041-11, 2017)
4	Kelekatan terhadap Aspal	(AASHTO T182-84, 1993)

Sumber: Peraturan Terkait

3.6 Pencampuran Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan

Ada 2 teknik pencampuran limbah plastik pada campuran aspal, yaitu:

a. Metode Basah (*Wet process*)

Metode pencampuran dimana CRM dimasukkan ke dalam aspal panas dan diaduk dengan kecepatan tinggi sampai homogen. Cara ini membutuhkan tambahan dana yang cukup besar antara lain bahan bakar, *mixer* kecepatan tinggi sehingga aspal modifikasi yang dihasilkan harganya cukup besar dibandingkan dengan aspal konvensional.

b. Metode Kering (*Dry process*)

Metode pencampuran dimana CRM dimasukkan ke dalam agregat yang dipanaskan pada temperatur campuran, kemudian aspal panas ditambahkan. Cara ini bisa lebih murah dibandingkan cara basah, dan juga lebih mudah dengan hanya memasukkan CRM ke dalam agregat panas, tanpa membutuhkan peralatan lain untuk mencampur (mixer).

3.7 Pembuatan Benda Uji

Berikut merupakan tahapan dalam pembuatan benda uji:

- a) Pengujian agregat, aspal, maupun *filler* sesuai dengan ketentuan Peraturan Umum Bina Marga 2018
- b) Merancang komposisi campuran, adapun hal – hal yang perlu dilakukan adalah:
 - Menghitung berat aspal sesuai variable penelitian
 - Menghitung berat agregat sesuai variable penelitian
 - Menghitung bahan tambahan sesuai variable penelitian

Catatan: *Berat masing – masing benda uji adalah 1200 gr*

- c) Kemudian dibuat masing – masing 5 benda uji untuk setiap aspal dengan bahan tambahan Modifikasi *crumb rubber* dari Limbah Ban Kendaraan: 5%, 10%, 15%. 20% dari berat kadar aspal rencana
- d) Memanaskan aspal kemudian dimasukkan *crumb rubber* dengan ukuran *mesh* #40 dan #60 secara terpisah dengan suhu pemanasan tidak melebihi nilai dari titik nyala dan titik bakar dari uji aspalnya, lalu diaduk menggunakan mixer sampai homogen
- e) Kemudian melakukan pemadatan standar dengan menggunakan alat *Marshall Automatic Compcator* dengan jumlah tumbukan sebanyak 50 kali
- f) Benda uji kemudian didiamkan agar suhunya turun, setelah itu dikeluarkan dengan menggunakan *ejector* dan diberi kode dengan penanda. Lalu kemudian timbang untuk mendapat bberat benda uji kering
- g) Benda uji direndam dalam air selama 16-24 jam supaya jenuh
- h) Kemudian benda uji dikeluarkan dari bak perendam dan dikeringkan dengan kain lap sampai permukaan kering dan didapatkan berat benda uji kering permukaan (*saturated surface dry, SSD*) kemudian ditimbang.

3.8 Pengujian Marshall

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan ketahanan (stabilitas) terhadap kelelahan (flow) dari campuran aspal sesuai dengan SNI 06-2489-1991. Pengujian *Marshall* dilakukan dengan memanfaatkan alat tekan yang dilengkapi dengan cincin penguji berkapasitas 2500 Kg. Pembebanan dengan kecepatan tetap (2 *inch.*) per menit, dibaca pada saat arloji pembebanan berhenti dan mulai kembali berputar menurun, pada saat itu pula dibaca arloji kelelahan. Titik pembacaan pada saat arloji pembebanan berhenti dan mulai kembali menurun. Di bawah ini akan dijelaskan mengenai langkah-langkah pengujian *Marshall* (RSNI M-01-2003 tentang Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas dengan Alat *Marshall*, 2003):

1. Rendamlah benda uji dalam penangas air selama 30-40 menit dengan temperatur tetap 60°C ± 1°C
2. Benda uji direndam selama 24 jam untuk mengetahui indeks perendaman
3. Setelah 24 jam, keluarkan benda uji dan letakkan pada bagian bawah alat penekan uji *marshall*
4. Pasang bagian atas alat penekan uji *marshall* pada bagian atas benda uji dan letakkan seluruhnya dalam mesin uji *marshall*
5. Pasang arloji pengukur pelelehan pada kedudukannya di atas salah satu batang penuntun dan atur kedudukan jarum penunjuk pada angka nol, sementara selubung tangkai arloji (sleeve) dipegang pada bagian atas kepala penekan
6. Sebelum pembebanan diberikan, kepala penekan dinaikkan hingga menyentuh alas cincin penguji
7. Atur jarum arloji tekan pada kedudukan angka nol
8. Berikan pembebanan pada benda uji dengan kecepatan tetap sekitar 50.8 mm (2 in) per menit sampai pembebanan maksimum tercapai. Untuk pembebanan menurun seperti yang ditunjukkan oleh jarum arloji tekan dan catat pembebanan maksimum (stabilitas) yang dicapai. Untuk benda uji dengan tebal tidak sama dengan 63.5 mm, beban harus dikoreksi dengan faktor pengali.
9. Catat nilai pelelehan yang ditunjukkan oleh jarum arloji pengukur pelelehan pada saat pembebanan maksimum tercapai.

3.9 Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)

Suatu metode pengujian untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal beton. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui indikasi akan terjadinya retak di lapangan. Pengujian ini dilakukan sesuai SNI 6753-2015 yang mengacu pada ASTM D6931-12, (2007). Di bawah ini akan dijelaskan mengenai langkah-langkah pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*:

1. Ambil benda uji dari bak perendam, kemudian ukur tebal dari benda uji
2. Benda uji kemudian diletakkan di antara beban strip. Setelah itu benda uji dan beban strip diletakkan di antara pelat pengujian kemudian diberikan beban dengan kecepatan konstan yaitu 50 mm per menit. Beban diberikan sepanjang diameter dari benda uji.
3. Catat kuat tekan maksimum yang tercatat pada mesin pengujian, kemudian pembebanan dilanjutkan sampai terjadi retak vertikal
4. Keluarkan benda uji dan kemudian dicoba untuk ditekan dengan tangan pada daerah retak hingga terbelah
5. Setelah itu lihat permukaan dalam yang terbelah dari benda uji dan lihat kondisi kemungkinan adanya keretakan atau pecahnya agregat. Secara visual, estimasi tingkat kerusakan diukur dalam skala 0 sampai dengan 5 (angka 5 menunjukkan kerusakan paling parah)

3.10 Variasi Benda Uji

Pada penelitian ini, terdapat beberapa variasi kadar Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan dan jumlah benda uji yang akan direncanakan. Perencanaan variasi penambahan Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan sebesar 5%, 10%, 15%, 20% dengan jumlah benda uji sebanyak 3 buah untuk setiap variasi Modifikasi *Crumb Rubber* dari Limbah Ban Kendaraan dari total berat aspal optimum yang telah ditentukan.

3.11 Analisa dan Pembahasan

Hasil pengolahan akan diuraikan dalam bentuk grafik hubungan antara kadar aspal dan parameter *Marshall* serta *Indirect Tensile Strength (ITS)*, yaitu gambar grafik hubungan antara:

- Kerapatan campuran (*density*)
- Prosentase rongga dalam campuran (*VIM*)

- Prosentase rongga dalam campuran yang terisi aspal (*VFA*)
- Prosentase rongga di antara mineral agregat (*VMA*)
- Stabilitas
- Kelelehan (*flow*)
- Hasil bagi *Marshall* (*Marshall Quotient*)
- *ITS Dry*
- *ITS Wet*
- Rasio *ITS* (*ITSR*)

3.12 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran didasarkan dari hasil analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan selama penelitian. Kesimpulan bertujuan untuk mempermudah pembaca mengetahui serta memperoleh gambaran ringkasan hasil dari penelitian. Saran yang diberikan didapat dari evaluasi atau kekurangan dari penelitian yang dilakukan sehingga menjadi bahan perbaikan pada penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Material

Pengujian material meliputi pengujian agregat dan pengujian aspal. Pengujian material dilakukan untuk mengetahui apakah material yang akan digunakan dalam penelitian ini memenuhi spesifikasi atau tidak. Jika material memenuhi spesifikasi fisik serta spesifikasi Lataston Lapis Aus, maka bisa dilakukan tahap selanjutnya. Jika tidak, harus dilakukan pengecekan ulang atau mengganti material yang sudah ada.

Pada penelitian ini, acuan yang digunakan untuk menguji material adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*.

4.1.1 Analisa Saringan Agregat

Analisa Saringan Agregat dimaksudkan untuk menentukan prosentase berat butiran agregat yang lolos dari satu set saringan. Pada penelitian ini digunakan 3 jenis agregat yaitu agregat ukuran 10-10 mm, 5-10 mm, dan 0-5 mm. Sedangkan pengujian analisa saringan dilakukan sebanyak 3 kali untuk setiap ukuran agregatnya agar mendapatkan hasil yang valid. Hasil dari uji analisa saringan adalah sebagai berikut:

A. Agregat Kasar 10-10 mm

Tabel 4. 1 Analisa Saringan Agregat Kasar 10-10 mm

Agregat 10/10		Berat Sampel:				2000	gr	
Saringan		Berat Tertahan (gr)				Jumlah Tertahan	Presentase	
No	mm	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata		Tertahan	Lolos
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,54	500,00	900,00	1500,00	966,67	966,67	48,33	51,67
3/8"	9,5	1195,00	801,00	117,60	704,53	1671,20	83,56	16,44
4	4,75	300,00	288,00	377,00	321,67	1992,87	99,64	0,36
8	2,36							
16	1,18							
30	0,60							
50	0,30							
100	0,15							
200	0,075							
Pan								
Jumlah		1995,00	1989,00	1994,60	1992,87			

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Pada **Tabel 4.1** dapat dilihat bahwa berat sampel awal adalah 2000 gr, setelah dilakukan penyaringan berat tertahan sampel adalah 992,87 gr.

- Contoh perhitungan jumlah berat tertahan :
 Saringan 3/8” = Jumlah berat tertahan saringan 3/4” + Rata – rata berat tertahan saringan 1/2”
 $= 0 + 966,67$
 $= 966,67 \text{ gr}$
- Contoh perhitungan jumlah (%) tertahan:

$$\text{Saringan } \frac{1}{2} = \frac{\text{Jumlah Berat Tertahan}}{\Sigma \text{ Jumlah Berat Tertahan}} \times 100\%$$

$$= \frac{966,67}{2000} \times 100\%$$

$$= 48,33\%$$
- Contoh perhitungan jumlah (%) lolos:

$$\text{Saringan } \frac{1}{2} = 100\% - \text{Jumlah } (\%) \text{ Tertahan Saringan } \frac{1}{2}$$

$$= 100\% - 48,33\%$$

$$= 51,67\%$$

B. Agregat Sedang 5-10 mm

Tabel 4. 2 Analisa Saringan Agregat Sedang 5-10 mm

Agregat 5/10					Berat Sampel :		2000	gr
Saringan		Berat Tertahan (gr)				Jumlah Tertahan	Presentase	
No	mm	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata		Tertahan	Lolos
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	446,00	421,00	443,00	436,67	436,67	21,83	78,17
4	4,75	777,00	656,00	712,00	715,00	1151,67	57,58	42,42
8	2,36	468,00	421,00	411,00	433,33	1585,00	79,25	20,75
16	1,18	100,00	277,00	100,00	159,00	1744,00	87,20	12,80
30	0,60	125,00	189,00	249,00	187,67	1931,67	96,58	3,42
50	0,30							
100	0,15							

Agregat 5/10					Berat Sampel :		2000	gr
Saringan		Berat Tertahan (gr)				Jumlah Tertahan	Presentase	
No	mm	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata		Tertahan	Lolos
200	0,075							
Pan								
Jumlah		1916,00	1964,00	1915,00	1931,67			

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Pada **Tabel 4.2** dapat dilihat bahwa berat sampel awal adalah 2000 gr, setelah dilakukan penyaringan berat tertahan sampel adalah 1931,67 gr.

- Contoh perhitungan jumlah berat tertahan :
Saringan No. 4 = Jumlah berat tertahan saringan 3/8'' + Rata – rata berat tertahan saringan No. 4
= 436,67 + 1151,67
= 1585,00 gr
- Contoh perhitungan jumlah (%) tertahan:

$$\begin{aligned}
 \text{Saringan No.4} &= \frac{\text{Jumlah Berat Tertahan}}{\Sigma \text{Jumlah Berat Tertahan}} \times 100\% \\
 &= \frac{1151,67}{2000} \times 100\% \\
 &= 57,58\%
 \end{aligned}$$

- Contoh perhitungan jumlah (%) lolos:
Saringan No.4 = 100% - Jumlah (%) Tertahan Saringan No. 4
= 100% - 57,58%
= 42,42%

C. Agregat Halus 0-5 mm

Tabel 4. 3 Analisa Saringan Agregat Sedang 0-5 mm

Agregat 0/5					Berat Sampel :		2000	gr
Saringan		Berat Tertahan (gr)				Jumlah Tertahan	Presentase	
No	mm	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata		Tertahan	Lolos
1"	25,4	0	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,1	0	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00

Agregat 0/5					Berat Sampel :		2000	gr
Saringan		Berat Tertahan (gr)				Jumlah Tertahan	Presentase	
No	mm	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata		Tertahan	Lolos
1/2"	12,54	0	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,5	0	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,75	1,5	2,2	2,21	1,97	1,97	0,10	99,90
8	2,36	300	350	307,88	319,29	321,26	16,06	83,94
16	1,18	290	322	235	282,33	603,60	30,18	69,82
30	0,60	56	50	145	83,67	687,26	34,36	65,64
50	0,30	200	210	100	170,00	857,26	42,86	57,14
100	0,15	350	400	377	375,67	1232,93	61,65	38,35
200	0,075	625	400	435	486,67	1719,60	85,98	14,02
Pan		86,5	190	321	199,17	1918,76	95,94	4,06
Jumlah		1909,00	1924,20	1923,09	1918,76			

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Pada **Tabel 4.3** dapat dilihat bahwa berat sampel awal adalah 2000 gr, setelah dilakukan penyaringan berat tertahan sampel adalah 1918,76 gr.

- Contoh perhitungan jumlah berat tertahan :
 Saringan No. 4 = Jumlah berat tertahan saringan 3/8" + Rata – rata berat tertahan saringan No. 4
 $= 0 + 1,97$
 $= 1,97 \text{ gr}$
- Contoh perhitungan jumlah (%) tertahan:

$$\text{Saringan No.4} = \frac{\text{Jumlah Berat Tertahan}}{\Sigma \text{Jumlah Berat Tertahan}} \times 100\%$$

$$= \frac{1,97}{2000} \times 100\%$$

$$= 0,10 \%$$
- Contoh perhitungan jumlah (%) lolos:
 Saringan No.4 = 100% - Jumlah (%) Tertahan Saringan No. 4
 $= 100\% - 0,10 \%$
 $= 99,90 \%$

4.1.2 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis curah, berat jenis jenuh kering permukaan (SSD), berat jenis semu dan penyerapan air agregat. Pada penelitian ini digunakan 3 jenis agregat yaitu agregat ukuran 10-10 mm, 5-10 mm, dan 0-5 mm dimana dalam pengujiannya dilakukan 3 kali percobaan. Hasil dari uji berat jenis dan penyerapan air agregat terlampir sebagai berikut :

A. Agregat Kasar 10-10 mm

Tabel 4. 4 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar 10-10 mm

Agregat 10/10				
Jenis Pengujian	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata
Benda Uji direndam selama (Hari)	4	4	4	4
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	2000 gr	2000 gr	2000 gr	2000 gr
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (Bj)	2015,4 gr	2005,1 gr	2042,3 gr	2020,9 gr
Berat Benda Uji dalam Air (Ba)	1289,7 gr	1291,1 gr	1291,3 gr	1290,7 gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Perhitungan Berat Jenis Curah (*Bulk Specific Gravity*)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bk}{Bj - Ba} = \frac{2000 \text{ gr}}{2020,9 \text{ gr} - 1290,7 \text{ gr}} = 2,73$$

- Perhitungan Berat Jenis Jenuh Permukaan (SSD)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bj}{Bj - Ba} = \frac{2020,9 \text{ gr}}{2020,9 \text{ gr} - 1290,7 \text{ gr}} = 2,76$$

- Perhitungan Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bk}{Bk - Ba} = \frac{2000 \text{ gr}}{2000 \text{ gr} - 1290,7 \text{ gr}} = 2,81$$

- Perhitungan Penyerapan Agregat

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan} &= \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\% \\ &= \frac{2020,9 \text{ gr} - 2000 \text{ gr}}{2000 \text{ gr}} \times 100\% \\ &= 1,04\% \end{aligned}$$

Sesuai SNI 03-1969-1990, nilai penyerapan air $\leq 3\%$. Dari pengujian yang dilaksanakan nilai penyerapan air memenuhi spesifikasi yaitu 1,04%.

B. Agregat Sedang 5-10 mm

Tabel 4. 5 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Sedang 5-10 mm

Agregat 5/10				
Jenis Pengujian	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata
Benda Uji direndam selama (Hari)	4	4	4	4
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	2000 gr	2000 gr	2000 gr	2000 gr
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (Bj)	2012,6 gr	2019,8 gr	2040,4 gr	2024,3 gr
Berat Benda Uji dalam Air (Ba)	1291,1 gr	1291,7 gr	1292,0 gr	1291,6 gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Perhitungan Berat Jenis Curah (*Bulk Specific Gravity*)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bk}{Bj - Ba} = \frac{2000 \text{ gr}}{2024,3 \text{ gr} - 1291,6 \text{ gr}} = 2,72$$

- Perhitungan Berat Jenis Jenuh Permukaan (SSD)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bj}{Bj - Ba} = \frac{2024,3 \text{ gr}}{2024,3 \text{ gr} - 1291,6 \text{ gr}} = 2,76$$

- Perhitungan Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bk}{Bk - Ba} = \frac{2000 \text{ gr}}{2000 \text{ gr} - 1291,6 \text{ gr}} = 2,82$$

- Perhitungan Penyerapan Agregat

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan} &= \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\% \\ &= \frac{2024,3 \text{ gr} - 2000 \text{ gr}}{2000 \text{ gr}} \times 100\% \\ &= 1,21\% \end{aligned}$$

Sesuai SNI 03-1969-1990, nilai penyerapan air $\leq 3\%$. Dari pengujian yang dilaksanakan nilai penyerapan air memenuhi spesifikasi yaitu 1,21%.

C. Agregat Halus 0-5 mm

Tabel 4. 6 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 0-5 mm

Agregat 0/5				
Jenis Pengujian	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata
Benda Uji direndam selama (Hari)	4	4	4	4
Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	407,1 gr	410,7 gr	431,8 gr	416,5 gr
Berat Piknometer diisi Air (B)	659,0 gr	659,0 gr	659,0 gr	659,0 gr
Berat Piknometer + Agg SSD + Air (Bt)	935,1 gr	929,8 gr	928,7 gr	931,2 gr
Benda Uji Kering Oven (Bk)	450,8 gr	361,3 gr	420,7 gr	410,9 gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Perhitungan Berat Jenis Curah (*Bulk Specific Gravity*)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bk}{B+SSD-Bt} = \frac{410,9 \text{ gr}}{659 \text{ gr} + 416,5 \text{ gr} - 931,2 \text{ gr}} = 2,84$$
- Perhitungan Berat Jenis Jenuh Permukaan (SSD)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{SSD}{B+Bk-Bt} = \frac{416,5 \text{ gr}}{659 \text{ gr} + 410,9 \text{ gr} - 931,2 \text{ g}} = 2,88$$
- Perhitungan Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$\text{Berat Jenis} = \frac{Bk}{B+Bk-Bt} = \frac{410,9 \text{ gr}}{659 \text{ gr} + 410,9 \text{ gr} - 931,2 \text{ g}} = 2,96$$
- Perhitungan Penyerapan Agregat

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan} &= \frac{SSD-Bk}{Bk} \times 100\% \\ &= \frac{416,5 \text{ gr} - 410,9 \text{ gr}}{410,9 \text{ gr}} \times 100\% \\ &= 1,36 \% \end{aligned}$$

Sesuai SNI 03-1969-1990, nilai penyerapan air $\leq 3\%$. Dari pegujian yang dilaksanakan nilai penyerapan air memenuhi spesifikasi yaitu 1,36 %.

4.1.3 Keausan Agregat

Daya Tahan Agregat adalah ketahan agregat untuk tidak hancur/pecah oleg pengaruh Mekanis (Gegradasi) ataupun Kimia

(Disintegrasi). Degradasi didefinisikan sebagai pelapukan mekanis yang diberikan pada waktu penimbunan, pemadatan ataupun beban lalu lintas. Dengan Mesin Los Angeles, hal yang dapat diuji adalah dengan adanya pengaruh Mekanis (Degradasi) saja. Pada benda uji yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ " dan tertahan saringan $\frac{3}{8}$ ", serta jumlah bola 11 buah dan jumlah putaran sebanyak 500. Hasil dari uji keausan agregat terlampir sebagai berikut:

- Berat agregat tertahan ayakan $\frac{3}{8}$ " = 2500 gr
- Berat agregat tertahan ayakan $\frac{1}{2}$ " = 2500 gr
- Berat benda uji (A) = 5000 gr
- Berat benda uji tertahan ayakan No. 12 (B) = 4131,5 gr

$$\begin{aligned} \text{Nilai Keausan} &= \frac{A-B}{A} \times 100\% \\ &= \frac{5000-4131,5}{5000} \times 100\% \\ &= 17,37\% \end{aligned}$$

Dari pengujian sifat fisik agregat diatas, maka didapatkan hasil yang terlampir dalam Tabel

Tabel 4. 7 Hasil Uji Sifat Fisik Agregat

No.	Pengujian	Metode	Batas	Hasil	Ket.
Agregat Kasar 10/10					
1.	Berat Jenis Curah	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,74	OK
2.	Berat Jenis SSD	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,77	OK
3.	Berat Jenis Semu	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,82	OK
4.	Penyerapan Air	SNI 03-1969-2008	$\leq 3\%$	1,05	OK
5.	Keausan Agregat	SNI 03-2417-1991	$\leq 40\%$	17,37%	OK
Agregat Sedang 50/10					
1.	Berat Jenis Curah	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,73	OK
2.	Berat Jenis SSD	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,76	OK
3.	Berat Jenis Semu	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,82	OK
4.	Penyerapan Air	SNI 03-1969-2008	$\leq 3\%$	1,21	OK
Agregat Halus 0/5					
1.	Berat Jenis Curah	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,85	OK
2.	Berat Jenis SSD	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,89	OK
3.	Berat Jenis Semu	SNI 03-1970-2008	$\geq 2,5$	2,96	OK
4.	Penyerapan Air	SNI 03-1969-2008	$\leq 3\%$	1,36	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.7**, maka didapat kesimpulan bahwa semua fraksi agregat yang digunakan memenuhi standart yang telah ditentukan.

Dalam menghitung Parameter *Marshall*, diperlukan parameter hitungan yaitu:

- Berat Jenis Bulk Agregat Gabungan (Gsb)
- Berat Jenis Efektif Agregat Gabungan (Gse)

Berikut merupakan rekapitulasi hasil pengujian agregat serta cara menghitung nilai (Gsb) dan (Gse):

Tabel 4. 8 Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat

Fraksi	% Agregat	Berat Jenis			% Penyerapan	BJ Pakai	[B]/[G]
		Bulk	SSD	Semu			
A	B	C	D	E	F	G	H
Agg. 10/10	15,0 %	2,74	2,77	2,82	1,05	2,78	5,397108
Agg. 5/10	25,0 %	2,73	2,76	2,82	1,21	2,78	9,004113
Agg. 0/5	60,0 %	2,85	2,89	2,96	1,36	2,90	20,65689
Total							35,05811

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Menghitung Berat Jenis Bulk Agregat Gabungan (Gsb)

$$\begin{aligned}
 \text{Gsb} &= \frac{100}{\frac{\% \text{Agg. } 10/10}{\text{BJ. Agg } 10/10} + \frac{\% \text{Agg. } 5/10}{\text{BJ. Agg } 5/10} + \frac{\% \text{Agg. } 0/5}{\text{BJ. Agg } 0/5}} \\
 &= \frac{100}{\frac{15\%}{2,74} + \frac{25\%}{2,73} + \frac{60\%}{2,85}} \\
 &= 2,8004
 \end{aligned}$$

- Menghitung Berat Jenis Efektif Agregat Gabungan (Gse)

$$\text{Gse} = \frac{100}{\frac{\% \text{Agg. } 10/10}{\text{BJ. Agg } 10/10} + \frac{\% \text{Agg. } 5/10}{\text{BJ. Agg } 5/10} + \frac{\% \text{Agg. } 0/5}{\text{BJ. Agg } 0/5}}$$

$$= \frac{100}{\frac{15\%}{2,78} + \frac{25\%}{2,78} + \frac{60\%}{2,90}}$$

$$= 2,8524$$

Berdasarkan hasil pada **Tabel 4.8** dan perhitungan nilai Gsb serta Gse didapatkan hasil 2,80 untuk nilai Gsb dan 2,85 untuk nilai Gse.

4.1.4 Hasil Pengujian Aspal

Hasil pengujian aspal yang digunakan untuk campuran pada penelitian ini adalah aspal penetrasi 60/70, dimana didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 4. 9 Hasil Uji Karakteristik Aspal

REKAPITULASI						
No.	Pengujian	Metode	Syarat		Hasil	Ket
			Min	Max		
1.	Penetrasi	SNI 06-2456-2011	60	79	65,75	OK
2.	Titik Lembek	SNI 06-2456-2011	48	58	52,88	OK
3.	Titik Nyala	SNI 06-2456-2011	200	-	205	OK
4.	Titik Bakar	SNI 06-2456-2011	200	-	223	OK
5.	Daktalitas	SNI 06-2456-2011	100	-	156	OK
6.	Kehilangan Berat	SNI 06-2440-1991	-	0,8	0,24	OK
7.	Berat Jenis	SNI 06-2456-2011	1	-	1,08	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.2 Perencanaan Proporsi Agregat Gabungan

Perencanaan campuran menggunakan metode Bina Marga dimulai dari kadar aspal efektif yang tetap sesuai dengan yang telah ditetapkan dalam spesifikasi. Dimana spesifikasi yang dipakai dalam penelitian ini adalah Lataston Lapis Aus atau biasa disebut dengan *HRS WC*. Pada penelitian ini digunakan penggabungan 3 fraksi agregat dengan cara analitis. Berikut cara dan tahapan penggabungan gradasi dengan cara analitis :

$$P = a.A + b.B + c.C + d.D$$

Dimana,

P = Persen lolos saringan dengan ukuran (mm) yang diinginkan

A = Persen lolos saringan fraksi agregat kasar ukuran $d = \dots$ mm

B = Persen lolos saringan fraksi agregat sedang ukuran $d = \dots$ mm

C = Persen lolos saringan fraksi agregat halus ukuran $d = \dots$ mm

D = Persen lolos saringan fraksi agregat filler ukuran $d = \dots$ mm

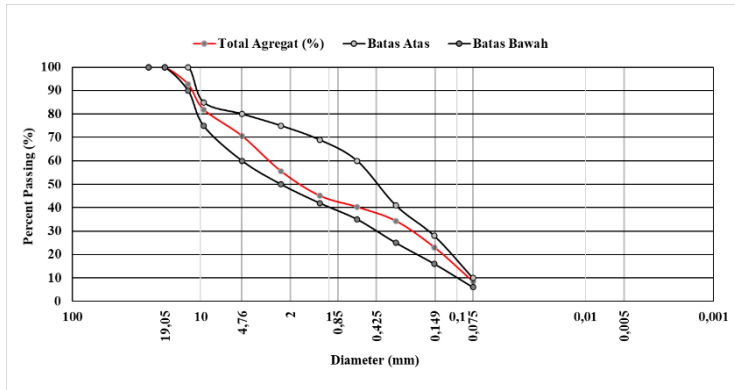
Untuk presentase nilai a, b, c, diperoleh dari perhitungan grafis sesuai dengan spesifikasi yang diatur pada peraturan Bina Marga 2018 mengenai batas agregat campuran *HRS – WC*. Berikut table dan perhitungan mengenai presentase penggabungan agregat (*combined aggregate*):

Tabel 4. 10 Presentase Penggabungan Agregat (*Combined Aggregate*)

Blending Agregat										
Saringan		Agg. 10/10	Agg. 5/10	Agg. 0/5	Filler	Total	Spesifikasi HRS - WC			Control Spek
No	mm	15 %	25 %	60 %	%		BB	-	BA	
1"	25,4	15,00	25,00	60,00	0	100	100	-	100	OK
3/4"	19,1	15,00	25,00	60,00	0	100	100	-	100	OK
1/2"	12,54	7,75	25,00	60,00	0	92,75	90	-	100	OK
3/8"	9,5	2,47	19,54	60,00	0	82,01	75	-	85	OK
4	4,75	0,05	10,60	59,94	0	70,60	60	-	80	OK
8	2,36	0,00	5,19	50,36	0	55,55	50	-	75	OK
16	1,18	0,00	3,20	41,89	0	45,09	42	-	69	OK
30	0,600	0,00	0,85	39,38	0	40,24	35	-	60	OK
50	0,300	0,00	0,00	34,28	0	34,28	25	-	41	OK
100	0,150	0,00	0,00	23,01	0	23,01	16	-	28	OK
200	0,075	0,00	0,00	8,41	0	8,41	6	-	10	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari proporsi agregat campuran diatas, maka selanjutnya di plot kedalam grafik gabungan 3 fraksi dibawah agar dapat terlihat apakah proporsi tersebut sudah memenuhi spesifikasi *HRS – WC* atau belum. Pada proporsi agregat ini tidak ditambahkan *filler* karena sudah memenuhi spesifikasi



Gambar 4. 1 Grafik Proporsi Agregat
Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari grafik gabungan 3 fraksi diatas, terlihat bahwa proporsi campurannya berada diantara batas atas dan batas bawah sehingga proporsi campuran agregat yang akan dipakai dalam penelitian ini adalah:

Tabel 4. 11 Presentase Variasi Campuran

Agregat	Prosentase Campuran
Agg. Kasar (10-10) mm	15,00%
Agg. Medium (5-10) mm	25,00%
Agg. Halus (0-5) mm	60,00%
Filler	0,00%

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.3 Perencanaan Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji campuran dilakukan setelah semua material telah memenuhi spesifikasi, baik spesifikasi fisik maupun spesifikasi Lataston Lapis Aus. Pada pembuatan benda uji ada beberapa hal yang perlu diperhatikan yakni: jumlah benda uji, kadar aspal rencana, agregat yang digunakan, temperature campuran, dan pembuatan benda uji.

4.3.1 Penentuan Kadar Aspal Rencana

Dalam merencanakan campuran aspal, harus dilakukan perhitungan perkiraan awal kadar aspal optimum (Pb) sebagai berikut:

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

Dimana,

Pb : Kadar aspal tengah atau ideal, (persen terhadap berat campuran)

CA : Persen agregat tertahan saringan No.8

FA : Persen agregat lolos saringan No.8 dan tertahan saringan No.200

FF : (filler), Persen agregat minimal 75% lolos saringan No.200

K : Nilai konstanta (untuk nilai konstanta digunakan 0.5 - 1 untuk Lataston)

a. Fraksi Desain Butiran Agregat

Penentuan fraksi butiran agregat ditentukan sebagai rencana akan kebutuhan agregat yang digunakan. Meliputi agregat kasar, agregat sedang, dan agregat halus. Berikut adalah table perhitungan fraksi desain butiran agregat. Perhitungan % Lolos didapatkan dari hasil table proporsi agregat campuran.

1. Variasi komposisi agregat gabungan (No.8)

- Agregat 5-10 $= \sum (\% \text{ Lolos Ayakan No. 8}) \times (\% \text{ CA}/100)$
 $= 0,52 \%$
- Agregat 0-5 $= \sum (\% \text{ Lolos Ayakan No. 8}) \times (\% \text{ CA}/100)$
 $= 50,36 \%$
- Filler $= 0\%$

$$\begin{aligned} \text{Maka, FA} &= 0,52\% + 50,36\% + 0\% \\ &= 50,88\% \end{aligned}$$

2. Variasi komposisi agregat gabungan (No. 200)

- Agregat 0-5 $= \sum (\% \text{ Lolos Ayakan No. 200}) \times (\% \text{ CA}/100)$
 $= 8,41 \%$
- Filler $= 0\%$

$$\begin{aligned} \text{Maka, FF} &= 8,41\% + 0\% \\ &= 8,41\% \end{aligned}$$

Nilai Fraksi Butiran didapat:

$$\text{CA} = 100 - \text{FA}$$

$$\begin{aligned}
 &= 100 - 50,88 \\
 &= 49\% \\
 \text{FA} &= \text{FA} - \text{FF} \\
 &= 50,88 - 8,41 \\
 &= 42\% \\
 \text{FF} &= 8,41\% \\
 \text{Total} &= \text{CA} + \text{FA} + \text{FF} \\
 &= 49\% + 42\% + 8,41\% \\
 &= 100\%
 \end{aligned}$$

Sehingga, perkiraan aspal terpakai secara gradasi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Pb} &= 0,035(\% \text{CA}) + 0,045(\% \text{FA}) + 0,2(\% \text{FF}) + k \\
 &= 0,035(49) + 0,045(42) + 0,2(8,41) + 1 \\
 &= 6,31
 \end{aligned}$$

b. Fraksi Desain Butiran Campuran

Penentuan fraksi butiran campuran ditentukan sebagai rencana akan kebutuhan campuran agregat yang digunakan. Berikut penjelasan perhitungan mengenai fraksi desain butiran agregat. Nilai fraksi agregat didapat dari:

- Agregat Kasar (CA) = $\% \text{CA} \times ((100 - \text{Pb})/100)$
 $= 49\% \times ((100 - 6,31)/100)$
 $= 46\%$
- Agregat Halus (FA) = $\% \text{FA} \times ((100 - \text{Pb})/100)$
 $= 42\% \times ((100 - 6,31)/100)$
 $= 40\%$
- Filler (FF) = $\% \text{FF} \times ((100 - \text{Pb})/100)$
 $= 8,41\% \times ((100 - 6,31)/100)$
 $= 7,88\%$

Maka, nilai fraksi desain butiran campuran didapat sebesar :

$$\begin{aligned} \text{Total} &= 46\% + 40\% + 7,88\% + 6,31\% \\ &= 100\% \end{aligned}$$

c. Perkiraan Awal Penyerapan Aspal

Untuk menentukan nilai awal penyerapan aspal, dilakukan perhitungan nilai penyerapan air untuk setiap jenis agregat.

- Agregat 10-10 $= 0,15 \times \text{Penyerapan Agg. 10/10}$
 $= 0,15 \times 1,05$
 $= 0,157$
- Agregat 5-10 $= 0,25 \times \text{Penyerapan Agg. 5/10}$
 $= 0,25 \times 1,21$
 $= 0,303$
- Agregat 0-5 $= 0,60 \times \text{Penyerapan Agg. 0/5}$
 $= 0,60 \times 1,36$
 $= 0,819$

$$\begin{aligned} \text{Total} &= 0,157 + 0,303 + 0,819 \\ &= 1,279 \end{aligned}$$

Maka, nilai penyerapan aspal didapat sebesar:

Tabel 4. 12 Perkiraan Kadar Aspal

PB-1	5,89 %
PB-0,5	6,39 %
PB	6,89 %
PB+0,5	7,39 %
PB+1	7,89 %

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.3.2 Variasi Kadar Aspal Rencana

Untuk menentukan kadar aspal yang akan dijadikan sebagai rencana dasar, terlebih dahulu dilakukan perhitungan mengenai besaran proporsi untuk masing – masing material bahan uji sampel aspal. Seperti berat aspal dan jenis agregat dengan total berat 1200 gr untuk setiap sampel, berikut perhitungan mengenai proporsi campuran bahan:

Tabel 4. 13 Variasi Campuran Kadar Aspal 5,89%

Variasi 1			
Kadar Aspal Rencana			5,89 %
Berat Sampel			1200 gr
Berat Kadar Aspal			71 gr
Berat Agg. Kasar (10-10) mm	:	15%	169 gr
Berat Agg. Medium (5-10) mm	:	25%	282 gr
Berat Agg. Halus (0-5) mm	:	60%	678 gr
Filler	:	0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut penjelasan mengenai perhitungan variasi campuran KAO:

- Berat Kadar Aspal $= \frac{\%KAO}{100\%} \times \text{Berat Sampel}$
 $= \frac{5,89}{100} \times 1200 \text{ gr}$
 $= 71 \text{ gr}$
- Berat Agg. Kasar $= 1200 - 71$
 $= 1129$
 $= \frac{15}{100} \times 1129$
 $= 169 \text{ gr}$
- Berat Agg. Sedang $= \frac{25}{100} \times 1129$
 $= 282 \text{ gr}$
- Berat Agg. Halus $= \frac{60}{100} \times 1129$
 $= 678 \text{ gr}$

Tabel 4. 14 Variasi Campuran Kadar Aspal 6,39%

Variasi 2			
Kadar Aspal Rencana			6,39 %
Berat Sampel			1200 gr
Berat Kadar Aspal			77 gr
Berat Agg. Kasar (10-10) mm	:	15%	169 gr
Berat Agg. Medium (5-10) mm	:	25%	281 gr
Berat Agg. Halus (0-5) mm	:	60%	674 gr
Filler	:	0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 15 Variasi Campuran Kadar Aspal 6,89%

Variasi 3			
Kadar Aspal Rencana			6,89 %
Berat Sampel			1200 gr
Berat Kadar Aspal			83 gr
Berat Agg. Kasar (10-10) mm	:	15%	168 gr
Berat Agg. Medium (5-10) mm	:	25%	279 gr
Berat Agg. Halus (0-5) mm	:	60%	670 gr
Filler	:	0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 16 Variasi Campuran Kadar Aspal 7,39%

Variasi 4			
Kadar Aspal Rencana			7,39 %
Berat Sampel			1200 gr
Berat Kadar Aspal			89 gr
Berat Agg. Kasar (10-10) mm	:	15%	167 gr
Berat Agg. Medium (5-10) mm	:	25%	278 gr
Berat Agg. Halus (0-5) mm	:	60%	667 gr
Filler	:	0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 17 Variasi Campuran Kadar Aspal 7,89%

Variasi 5			
Kadar Aspal Rencana			7,89 %
Berat Sampel			1200 gr
Berat Kadar Aspal			95 gr
Berat Agg. Kasar (10-10) mm	:	15%	166 gr
Berat Agg. Medium (5-10) mm	:	25%	276 gr
Berat Agg. Halus (0-5) mm	:	60%	663 gr
Filler	:	0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.4 Pengujian Karakteristik Marshall Kadar Aspal Rencana

Pengujian marshall dilakukan untuk mendapatkan nilai kadar aspal optimum berdasarkan parameter yang telah ditentukan pada masing – masing benda uji. Dari pengujian marshall dapat diketahui apakah nilai kadar aspal rencana (PB) merupakan kadar aspal optimum atau tidak. Pada penelitian ini sampel benda uji dibuat sebanyak 5 buah untuk setiap kadar aspal rencana.

4.4.1 Density

Sesuai perhitungan berat kering, berat jenuh dan berat benda uji dalam air, maka didapat nilai *density* sebagai berikut:

Tabel 4. 18 Hasil *Density*

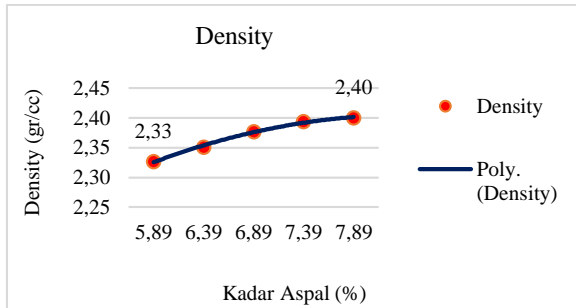
No	Kode Aspal	Berat Kering	Berat dalam Air	Berat SSD	Density
		gr	gr	gr	g/cm ³
Kadar Aspal Rencana = 5,89%					
1	N3	1170	698	1204,5	2,31
2	N4	1172	700,3	1211,4	2,29
3	N5	1200	717	1221,8	2,38
Rata Rata					2,33
Kadar Aspal Rencana = 6,39%					
1	N8	1197,9	689,5	1198,1	2,36
2	N9	1193	680	1194,1	2,32
3	N10	1191,1	690,4	1191,8	2,38
Rata Rata					2,35
Kadar Aspal Rencana = 6,89%					
1	N12	1186,8	689,8	1188,8	2,38
2	N13	1177,1	676	1177,9	2,35
3	N14	1184,9	694,7	1187,2	2,41

No	Kode Aspal	Berat Kering	Berat dalam Air	Berat SSD	Density
		gr	gr	gr	g/cm ³
Rata Rata					2,38
Kadar Aspal Rencana = 7,39%					
1	N17	1170	690	1170,1	2,44
2	N18	1183,8	688	1187	2,37
3	N20	1190,2	691	1192,9	2,37
Rata Rata					2,394
Kadar Aspal Rencana = 7,39%					
1	N22	1177,4	690	1177,9	2,41
2	N23	1170	695	1179	2,42
3	N25	1186,8	686,5	1187,4	2,37
Rata Rata					2,400

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Kepadatan (*density*) adalah tingkat kerapatan campuran setelah dipadatkan. Untuk memperoleh nilai kepadatan, terlebih dahulu dilakukan penimbangan berat benda uji pada 3 kondisi, yaitu keadaan kering, jenuh (*SSD*), dan dalam air. Untuk hasil perhitungan nilai *density* dapat dilihat pada **Tabel 4.18**. *Density* merupakan hasil bagi antara berat kering dengan berat isi benda uji. Berikut adalah contoh perhitungan *density* benda uji N1 dengan kadar aspal 5,89%.

$$\begin{aligned}
 \text{Density} &= \frac{\text{Berat Kering}}{\text{Berat SSD} - \text{Berat dalam Air}} \\
 &= \frac{1170}{1204,5 - 698} \\
 &= 2,31 \text{ gr/cc}
 \end{aligned}$$



Gambar 4. 2 Grafik Hasil Density

Dari **Grafik 4.2** dapat dilihat bahwa nilai *density* mengalami kenaikan seiring dengan penambahan kadar aspal 5,89% - 7,89%. Nilai *density* mengalami kenaikan pada kadar 6,39% - 7,89%. Nilai rata – rata *density* paling tinggi terdapat pada kadar aspal 7,89% yakni dengan nilai 2,40 gr/cc, dan nilai rata – rata *density* paling rendah terdapat pada kadar 5,89% dengan nilai 2,33 gr/cc.

Menurut Roberts, jika nilai kadar aspal naik maka nilai *density* akan ikut naik sampai mencapai puncak kemudian akan turun.

4.4.2 Void in Mix (VIM)

Void in Mix (VIM) merupakan volume total udara yang berada diantara partikel agregat yang terselimuti aspal dalam suatu campuran yang telah dipadatkan, dinyatakan dengan persen volume bulk suatu campuran. Adapun hasil analisa nilai *Void in Mix (VIM)* dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 4. 19 Hasil Nilai VIM

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VIM	Spek.	Keterangan
1	N3	5,89%	11,16	4 - 6	NO
2	N4		11,81	4 - 6	NO
3	N5		8,57	4 - 6	NO
Rata-Rata			10,51	4 - 6	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VIM	Spek.	Keterangan
1	N8	6,39%	8,74	4 - 6	NO
2	N9		10,08	4 - 6	NO
3	N10		7,95	4 - 6	NO
Rata-Rata			8,92	4 - 6	NO

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VIM	Spek.			Keterangan
1	N12	6,89%	7,16	4	-	6	NO
2	N13		8,45	4	-	6	NO
3	N14		6,08	4	-	6	NO
Rata-Rata			7,23	4	-	6	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VIM	Spek.			Keterangan
1	N17	7,39%	4,16	4	-	6	OK
2	N18		6,71	4	-	6	NO
3	N20		6,74	4	-	6	NO
Rata-Rata			5,87	4	-	6	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VIM	Spek.			Keterangan
1	N22	7,89%	4,40	4	-	6	OK
2	N23		4,24	4	-	6	OK
3	N25		6,14	4	-	6	NO
Rata-Rata			4,93	4	-	6	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan *Void in Mix (VIM)* benda uji N22 dengan kadar aspal 7,89%.

- Menghitung Berat Jenis Bulk Agregat Gabungan (Gsb)

$$\begin{aligned}
 Gsb &= \frac{100}{\frac{\%Agg. 10/10}{BJ. Agg 10/10} + \frac{\%Agg. 5/10}{BJ. Agg 5/10} + \frac{\%Agg. 0/5}{BJ. Agg 0/5}} \\
 &= \frac{100}{\frac{15\%}{2,74} + \frac{25\%}{2,73} + \frac{60\%}{2,85}} \\
 &= 2,80
 \end{aligned}$$

- Menghitung Berat Jenis Efektif Agregat Gabungan (Gse)

$$\begin{aligned}
 Gse &= \frac{100}{\frac{\%Agg. 10/10}{BJ. Agg 10/10} + \frac{\%Agg. 5/10}{BJ. Agg 5/10} + \frac{\%Agg. 0/5}{BJ. Agg 0/5}} \\
 &= \frac{100}{\frac{15\%}{2,78} + \frac{25\%}{2,78} + \frac{60\%}{2,90}}
 \end{aligned}$$

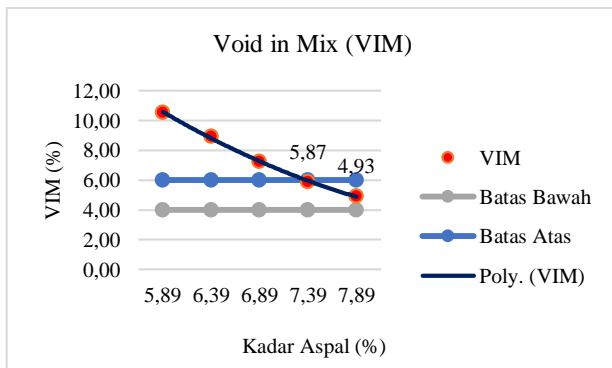
$$= 2,85$$

- Menghitung Berat jenis Maksimum Teoritis (Gmm)

$$\begin{aligned} Gmm &= \frac{100}{\frac{\%Agregat}{Gse} + \frac{\%Aspal}{BJ. Aspal}} \\ &= \frac{100}{\frac{92,11}{2,85} + \frac{7,89\%}{1,08}} \\ &= 2,52 \end{aligned}$$

- Menghitung Void in Mix

$$\begin{aligned} VIM &= 100 \times \frac{Gmm - BJ. Campuran}{Gmm} \\ &= 100 \times \frac{2,52 - 2,4}{2,52} \\ &= 4,40\% \end{aligned}$$



Gambar 4. 3 Grafik Hasil *VIM*

Grafik diatas menunjukkan hasil nilai *VIM* yang didapat pada masing – masing campuran kadar aspal. Seiring penambahan kadar aspal, nilai *VIM* cenderung mengalami penurunan.

Sesuai spesifikasi Bina Marga, nilai *VIM* untuk Lataston adalah sebesar 4% - 6%. Dari seluruh campuran kadar aspal yang sudah diuji, nilai *VIM* yang memenuhi spesifikasi adalah kadar aspal 7,39% - 7,89%.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa campuran aspal dengan kadar aspal 7,39% dan 7,89% dapat menjadi rekomendasi untuk pembuatan aspal modifikasi berdasarkan data diatas.

4.4.3 Void in Mineral Agregate (VMA)

Void in Mineral Agregat (VMA) menurut manual pekerjaan campuran aspal panas yaitu rongga udara dan volume kadar aspal efektif yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji.

Adapun hasil analisa *Void in Mineral Agregat (VMA)* dinyatakan pada **Tabel 4.20** dibawah ini:

Tabel 4. 20 Hasil Nilai VMA

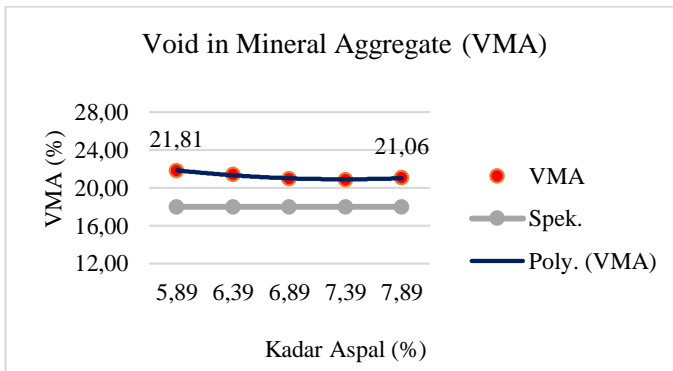
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VMA	Spek.	Keterangan
1	N3	5,89%	22,37	18	OK
2	N4		22,94	18	OK
3	N5		20,11	18	OK
Rata-Rata			21,81	18	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VMA	Spek.	Keterangan
1	N8	6,39%	21,27	18	OK
2	N9		22,43	18	OK
3	N10		20,59	18	OK
Rata-Rata			21,43	18	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VMA	Spek.	Keterangan
1	N12	6,89%	20,92	18	OK
2	N13		22,02	18	OK
3	N14		20,01	18	OK
Rata-Rata			20,98	18	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VMA	Spek.	Keterangan
1	N17	7,39%	19,41	18	OK
2	N18		21,55	18	OK
3	N20		21,58	18	OK
Rata-Rata			20,84	18	OK

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VMA	Spek.	Keterangan
1	N22	7,89%	20,63	18	OK
2	N23		20,49	18	OK
3	N25		22,07	18	OK
Rata-Rata			21,06	18	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan *Void in Mineral Agregate (VMA)* benda uji N3 dengan kadar aspal 5,89%.

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \text{VMA} &= 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100 \right) \\
 &= 100 - \left(\frac{2,36}{2,80} \times \frac{100}{100 + 5,89\%} \times 100 \right) \\
 &= 22,37\%
 \end{aligned}$$



Gambar 4. 4 Grafik Hasil VMA

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa semakin tinggi campuran kadar aspal, maka semakin tinggi nilai rongga diantara mineral agregat. Nilai *VMA* menurun pada campuran kadar aspal 7,89% yakni sebesar 21,06%. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai rata – rata *VMA* telah memenuhi Spesifikasi Bina Marga yakni tidak kurang dari 18%.

4.4.4 Void Filled with Asphalt (VFA)

Menurut Manual Pekerjaan Campuran Beraspal Panas Direktorat Jenderal Prasarana Wilayah Tahun 2004, *VFA* adalah bagian dari rongga yang berada diantara mineral agregat (*VMA*) yang terisi oleh aspal efektif, dan dinyatakan dalam persen.

Adapun hasil analisa *Void Filled with Asphalt (VFA)* dapat dilihat pada **Tabel 4.21**

Tabel 4. 21 Hasil Nilai VFA

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VFA	Spek.	Keterangan
1	N3	5,89%	50,12	68	NO
2	N4		48,52	68	NO
3	N5		57,37	68	NO
Rata-Rata			52,00	68	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VFA	Spek.	Keterangan
1	N8	6,39%	58,92	68	NO
2	N9		55,05	68	NO
3	N10		61,39	68	NO
Rata-Rata			58,45	68	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VFA	Spek.	Keterangan
1	N12	6,89%	65,80	68	NO
2	N13		61,64	68	NO
3	N14		69,61	68	OK
Rata-Rata			65,68	68	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VFA	Spek.	Keterangan
1	N17	7,39%	78,55	68	OK
2	N18		68,88	68	OK
3	N20		68,75	68	NO
Rata-Rata			72,06	68	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	VFA	Spek.	Keterangan
1	N22	7,89%	78,66	68	OK
2	N23		79,32	68	OK
3	N25		72,18	68	OK
Rata-Rata			76,72	68	OK

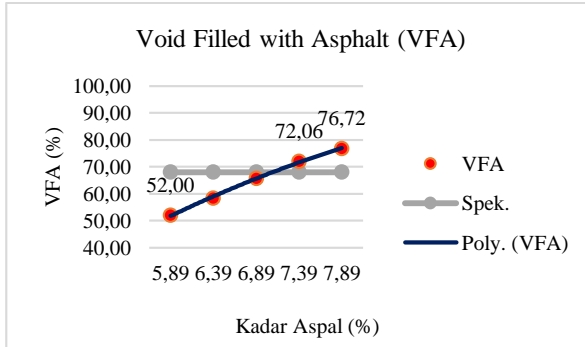
Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan *Void Filled Asphalt (VFA)* benda uji N22 dengan kadar aspal 7,89%.

- $$VFA = 100 - \left(\frac{VMA - VIM}{VMA} \right)$$

$$= 100 \times \left(\frac{20,63 - 4,40}{22,37} \right)$$

$$= 78,66\%$$



Gambar 4. 5 Grafik Hasil VFA

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa presentase rongga yang terisi aspal meningkat seiring dengan penambahan ccampuran kadar aspal. Nilai rata – rata *Void Filled Asphalt (VFA)* terkecil yakni 52,00% dengan kadar aspal 5,89%, sedangkan nilai rata – rata VFA tertinggi yakni sebesar 76,72% dengan kadar aspal 7,89%. Nilai VFA yang memenuhi spesifikasi HRS WC yakni lebih besar sama dengan 68% terdapat pada kadar aspal 7,39% - 7,89%.

4.4.5 Flow

Menurut Departemen Pekerjaan Umum, *flow* merupakan besarnya perubahan bentuk plastis suatu benda uji campuran beraspal yang terjadi akibat suatu beban sampai batas keruntuhan, dinyatakan dalam satuan panjang. Adapun hasil analisa *flow* dapat dilihat pada **Tabel 4.22**

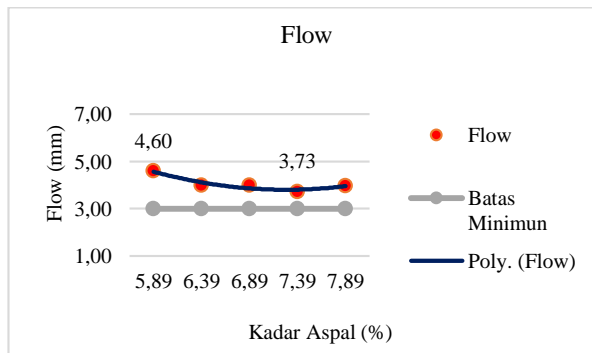
Tabel 4. 22 Hasil Nilai Flow

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Flow	Spek.	Keterangan
1	N3	5,89%	4,00	3,00	OK
2	N4		8,30	3,00	OK
3	N5		1,50	3,00	NO
Rata-Rata			4,60	3,00	OK

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Flow	Spek.	Keterangan
1	N8	6,39%	5,00	3,00	OK
2	N9		3,00	3,00	OK
3	N10		4,00	3,00	OK
Rata-Rata			4,00	3,00	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Flow	Spek.	Keterangan
1	N12	6,89%	4,00	3,00	OK
2	N13		4,00	3,00	OK
3	N14		4,00	3,00	OK
Rata-Rata			4,00	3,00	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Flow	Spek.	Keterangan
1	N17	7,39%	3,70	3,00	OK
2	N18		3,00	3,00	OK
3	N20		4,50	3,00	OK
Rata-Rata			3,73	3,00	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Flow	Spek.	Keterangan
1	N22	7,39%	2,80	3,00	NO
2	N23		2,10	3,00	NO
3	N25		7,00	3,00	OK
Rata-Rata			3,97	3,00	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai *flow* dinyatakan dalam grafik dibawah ini:



Gambar 4. 6 Grafik Hasil Flow

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *flow* cenderung mengalami penurunan. Nilai *flow* mengalaami penurunan pada campuran kadar aspal 6,39% dan 7,39% tetapi mengalami kenaikan pada campuran kadar aspal 6,89%. Sedangkan nilai *flow* tertinggi yakni sebesar 4,60% pada campuran kadar aspal 5,89% dan nilai *flow* terendah sebesar 3,73% pada campuran kadar aspal 7,39%.

4.4.6 Stabilitas

Menurut Sukirman, stabilitas merupakan kemampuan perkerasan jalan dalam menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, dan *bleeding*.

Adapun hasil analisa Stabilitas dapat dilihat pada **Tabel 4.23**

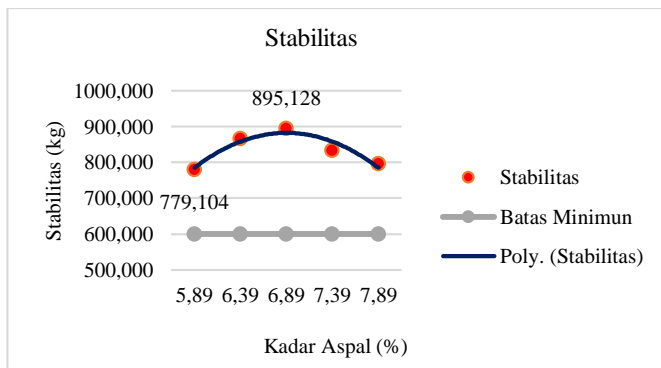
Tabel 4. 23 Hasil Nilai Stabilitas

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	N3	5,89%	826,272	600	OK
2	N4		761,040	600	OK
3	N5		750.000	600	OK
Rata-Rata			779,104	600	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	N8	6,39%	891,504	600	OK
2	N9		924,120	600	OK
3	N10		782,784	600	OK
Rata-Rata			866,136	600	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	N12	6,89%	945,864	600	OK
2	N13		945,864	600	OK
3	N14		793,656	600	OK
Rata-Rata			895,128	600	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	N17	7,39%	804,528	600	OK
2	N18		869,760	600	OK
3	N20		826,272	600	OK
Rata-Rata			833,520	600	OK

No	Kode Aspal	Kadar Aspal	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	N22	7,39%	837,144	600	OK
2	N23		850,000	600	OK
3	N25		700,000	600	OK
Rata-Rata			795,715	600	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai stabilitas dinyatakan dalam grafik dibawah ini:



Gambar 4. 7 Grafik Hasil Stabilitas

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan nilai stabilitas pada kadar aspal 6,39% - 6,89%, dan terjadi penurunan nilai stabilitas pada kadar aspal 7,39% - 7,89%. Jika ditarik garis regresi, maka dengan penambahan kadar aspal terjadi kenaikan nilai stabilitas kemudian turun kembali. Nilai rata – rata stabilitas tertinggi terdapat kadar aspal 6,89% sebesar 895,128 kg. Sedangkan nilai rata – rata stabilitas terendah terdapat pada kadar aspal 5,89%, yakni sebesar 779,104 kg. dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai rata – rata stabilitas telah memenuhi spesifikasi *HRS WC* yakni tidak kurang dari 600 kg

Menurut hasil penelitian oleh (Hardwiyono, 2012), nilai stabilitas akan naik seiring pertambahan kadar aspal hingga mencapai puncak, kemudian turun pada kadar aspal paling tinggi. Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa hasil stabilitas sama dengan penelitian terdahulu.

4.4.6 Marshall Quotient

Menurut Rahmawati, *Marshall Quotient* dihitung sebagai rasio dari stabilitas terhadap kelelahan yang digunakan sebagai indicator kekakuan campuran. Untuk hasil perhitungan nilai *Marshall Quotient* dapat dilihat pada **Tabel 4.23**

Tabel 4. 24 Hasil Nilai MQ

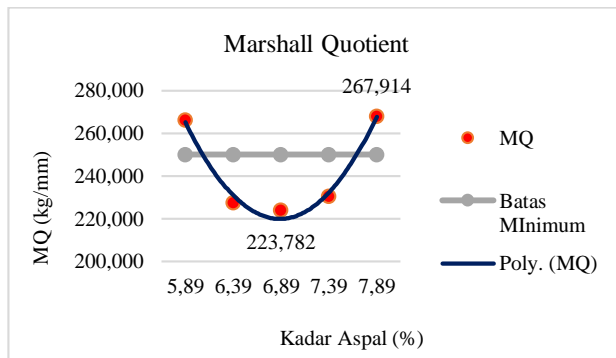
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	MQ	Spek.	Keterangan
1	N3	5,89%	206,568	250	NO
2	N4		91,692	250	NO
3	N5		500,000	250	OK
Rata-Rata			266,087	250	OK
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	MQ	Spek.	Keterangan
1	N8	6,39%	178,3008	250	NO
2	N9		308,04	250	OK
3	N10		195,696	250	NO
Rata-Rata			227,346	250	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	MQ	Spek.	Keterangan
1	N12	6,89%	236,466	250	NO
2	N13		236,466	250	NO
3	N14		198,414	250	NO
Rata-Rata			223,782	250	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	MQ	Spek.	Keterangan
1	N17	7,39%	217,44	250	NO
2	N18		289,92	250	OK
3	N20		183,616	250	NO
Rata-Rata			230,325	250	NO
No	Kode Aspal	Kadar Aspal	MQ	Spek.	Keterangan
1	N22	7,89%	298,98	250	OK
2	N23		404,7619	250	OK
3	N25		100	250	NO
Rata-Rata			267,914	250	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan *Marshall Quotient* benda uji N22 dengan campuran kadar aspal 7,89%. Sesuai perhitungan rencana dan hasil uji tes *Marshall*, didapat nilai *Marshall Quotient* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad MQ &= \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}} \\
 &= \frac{837,144}{2,8} \\
 &= 298,98 \text{ kg/mm}
 \end{aligned}$$

Hubungan antara kadar aspal dan *Marshall Quotient* dinyatakan dalam grafik dibawah ini:



Gambar 4. 8 Grafik Hasil MQ

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai MQ mengalami penurunan pada campuran kadar aspal 6,39% dan 6,89%, dan terjadi kenaikan kembali pada campuran kadar aspal 7,39%. Nilai rata – rata MQ tertinggi terdapat pada campuran kadar aspal 7,89%, yakni 267,914 kg/mm. sedangkan nilai rata – rata MQ terendah terdapat pada campuran kadar kadar aspal 6,89%, yakni sebesar 223,782 kg/mm. dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai rata – rata MQ yang memenuhi spesifikasi yakni minimal 250 kg/mm adalah campuran kadar aspal 5,89% dan 7,89%.

4.4.7 Kadar Aspal Optimum (KAO)

Tabel 4. 25 Kadar Aspal Optimum

Parameter Aspal	Spesifikasi	Kisaran	Kadar Aspal Optimum (KAO) %						
Stabilitas	> 600 kg	5,89 - 7,89							
Flow	> 3 mm	5,89 - 7,89							
VIM	4% - 6%	5,89 - 7,89							
VFA	> 68%	5,89 - 7,89							
VMA	> 18%	5,89 - 7,89							
MQ	> 250 kg/mm	5,89 - 7,89							
Kadar Aspal Rencana Pb (%)			5,89	6,39	6,89	7,39	7,89		
Kadar Aspal Optimum			7,89%						

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berdasarkan hasil uji *Marshall* yang telah dilakukan, maka didapat nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar **7,89%**. Kadar aspal tersebut akan digunakan sebagai acuan dalam pembuatan benda uji aspal dengan campuran modifikasi *crumb rubber*.

4.5 Perencanaan Pembuatan Benda Uji dengan Campuran Modifikasi Crumb Rubber

Perencanaan pembuatan benda uji dengan campuran Modifikasi *Crumb Rubber* menggunakan kadar aspal optimum (KAO) yakni 7,89%. Presentase *Crumb Rubber* yang akan digunakan memiliki variasi 5%, 10%, 15%, 20% dari dari berat rencana kadar aspal optimum. Berikut adalah perhitungan proporsi campuran aspal dengan penambahan Modifikasi *Crumb Rubber*:

Tabel 4. 26 Proporsi Campuran KAO + *Crumb Rubber* 5%

Kadar Aspal 7,89% + CR 5%		
Kadar Aspal Optimum		7,89 %
Berat Sampel		1200 gr
Berat Kadar Aspal Optimum		94,66 gr
Berat Kadar <i>Crumb Rubber</i>	: 5%	4,73 gr
Berat Kadar Aspal		89,93 gr
Berat Agg. Kasar (10-10)mm	: 15%	166 gr
Berat Agg. Medium (5-10)mm	: 25%	276 gr
Berat Agg. Halus (0-5)mm	: 60%	663 gr
Filler	: 0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Penjelasan mengenai perhitungan variasi campuran KAO adalah sebagai berikut:

- $$\begin{aligned} \text{Berat KAO} &= \frac{\%KAO}{100\%} \times \text{Berat Sample} \\ &= \frac{7,89\%}{100\%} \times 1200 \\ &= 94,66 \text{ gr} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \text{Berat } \textit{Crumb Rubber} &= \frac{\%CR}{100\%} \times \text{Berat KAO} \\ &= \frac{5\%}{100\%} \times 94,66 \\ &= 4,73 \text{ gr} \end{aligned}$$

Tabel 4. 27 Proporsi Campuran KAO + *Crumb Rubber* 10%

Kadar Aspal 7,89% + CR 10%		
Kadar Aspal Optimum		7,89 %
Berat Sampel		1200 gr
Berat Kadar Aspal Optimum		94,66 gr
Berat Kadar <i>Crumb Rubber</i>	: 10%	9,47 gr
Berat Kadar Aspal		85,19 gr
Berat Agg. Kasar (10-10)mm	: 15%	166 gr
Berat Agg. Medium (5-10)mm	: 25%	276 gr
Berat Agg. Halus (0-5)mm	: 60%	663 gr
Filler	: 0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 28 Proporsi Campuran KAO + *Crumb Rubber* 15%

Kadar Aspal 7,89% + CR 15%		
Kadar Aspal Optimum		7,89 %
Berat Sampel		1200 gr
Berat Kadar Aspal Optimum		94,66 gr
Berat Kadar <i>Crumb Rubber</i>	: 15%	14,20 gr
Berat Kadar Aspal		80,46 gr
Berat Agg. Kasar (10-10)mm	: 15%	166 gr
Berat Agg. Medium (5-10)mm	: 25%	276 gr
Berat Agg. Halus (0-5)mm	: 60%	663 gr
Filler	: 0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 29 Proporsi Campuran KAO + *Crumb Rubber* 20%

Kadar Aspal 7,89% + CR 20%		
Kadar Aspal Optimum		7,89 %
Berat Sampel		1200 gr
Berat Kadar Aspal Optimum		94,66 gr
Berat Kadar <i>Crumb Rubber</i>	: 20%	18,93 gr
Berat Kadar Aspal		75,73 gr
Berat Agg. Kasar (10-10)mm	: 15%	166 gr
Berat Agg. Medium (5-10)mm	: 25%	276 gr
Berat Agg. Halus (0-5)mm	: 60%	663 gr
Filler	: 0%	gr

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.6 Pengujian Karakteristik Aspal Modifikasi

- Berat Jenis Aspal

Tabel 4. 30 Nilai Berat Jenis Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Berat Jenis Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Berat Jenis	1,08	1,09	1,14	1,16	1,18
Berat Jenis Min.	1	1	1	1	1

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Penetrasi

Tabel 4. 31 Nilai Penetrasi Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Penetrasi Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Penetrasi	65,75	56,92	31,00	48,92	23,33
Spesifikasi	60 - 79	60 - 79	60 - 79	60 - 79	60 - 79

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Kehilangan Berat

Tabel 4. 32 Nilai Kehilangan Berat Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Kehilangan Berat Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Kehilangan Berat (%)	0,24	0,29	0,33	0,37	0,41
Spesifikasi	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Daktilitas

Tabel 4. 33 Nilai Daktilitas Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Daktilitas Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Daktilitas (cm)	156,00	39,00	31,00	24,50	26,75
Spesifikasi	≥ 100	≥ 100	≥ 100	≥ 100	≥ 100

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Titik Lembek

Tabel 4. 34 Nilai Titik Lembek Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Titik Lembek Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Titik Lembek (°C)	52,88	53,75	57,50	61,50	73,50
Spesifikasi	48 - 58	48 - 58	48 - 58	48 - 58	48 - 58

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

- Titik Bakar dan Titik Nyala

Tabel 4. 35 Nilai Titik Bakar Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Titik Bakar Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Titik Bakar (°C)	223	215	250	212	225
Spesifikasi	≥ 200	≥ 200	≥ 200	≥ 200	≥ 200

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 36 Nilai Titik Nyala Aspal Modifikasi

Aspal Pen. 60/70	Pengujian Titik Nyala Aspal				
	Kadar Campuran <i>Crumb Rubber</i> (%)				
	0%	5%	10%	15%	20%
Titik Nyala (°C)	213	215	250	236	228
Spesifikasi	≥ 200	≥ 200	≥ 200	≥ 200	≥ 200

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

4.7 Pengujian Karakteristik *Marshall* Kadar Aspal Optimum dengan Penambahan Modifikasi *Crumb Rubber*

Pengujian *Marshall* dilakukan untuk mendapatkan nilai campuran kadar aspal optimum (KAO) + Modifikasi *Crumb Rubber* yang terbaik berdasarkan parameter yang telah ditentukan pada masing – masing benda uji. Dari pengujian *Marshall* dapat diketahui apakah nilai (KAO) + kadar *crumb rubber* merupakan campuran aspal dengan *crumb rubber* yang optimum atau tidak. Pada penelitian ini sample benda uji dibuat sebanyak 3 buah untuk setiap campuran KAO + CR

4.7.1 Density

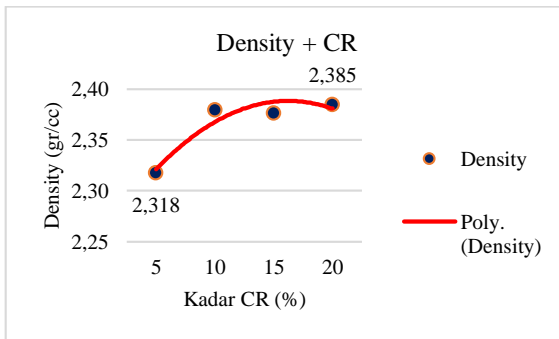
Sesuai perhitungan berat kering, berat jenuh (*SSD*), dan berat benda uji dalam air, maka didapat nilai *density* sebagai berikut:

Tabel 4. 37 Hasil Nilai *Density* dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Berat Kering	Berat dalam Air	Berat SSD	Density
		gr	gr	gr	g/cm ³
Kadar Aspal Rencana 7,89% + CR 5%					
1	NM1	1178,7	675,8	1192,1	2,28
2	NM3	1184,4	695,1	1196,1	2,36
3	NM4	1188,6	686,3	1201,8	2,31
Rata Rata					2,318
Kadar Aspal Rencana 7,89% + CR 10%					
1	NM6	1179,3	699,4	1193,5	2,39
2	NM8	1178,9	700	1191,4	2,40
3	NM9	1188,7	694,5	1199,8	2,35
Rata Rata					2,379
Kadar Aspal Rencana 7,89% + CR 15%					
1	NM12	1165,4	685,7	1185,2	2,33

No	Kode Aspal	Berat Kering	Berat dalam Air	Berat SSD	Density
		gr	gr	gr	g/cm ³
2	NM13	1174,7	705	1190,6	2,42
3	NM14	1167,6	690,6	1181,9	2,38
Rata Rata					2,376
Kadar Aspal Rencana 7,89% + CR 20%					
1	NM16	1177,6	693,2	1187,2	2,38
2	NM17	1183,8	700	1191,6	2,41
3	NM20	1180	689,1	1188,6	2,36
Rata Rata					2,385

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 9 Grafik Nilai Density dengan Penambahan CR

Dari **Gambar 4.9** diatas dapat dilihat bahwa grafik nilai density mengalami kenaikan seiring dengan penambahan kadar *crumb rubber* (CR). Nilai rata – rata density tertinggi terdapat pada kadar CR 20% dengan nilai 2,385 gr/cc, dan nilai rata – rata density terendah terdapat pada kadar CR 5% dengan nilai 2,318 gr/cc.

Menurut (Rahmawati et al., 2021) campuran HRS memiliki kepadatan yang lebih besar bersama dengan presentase CR yang lebih tinggi, karena rongga – rongga yang terdapat dalam campuran dapat diisi dengan aspal. Dengan demikian densitas campuran HRS menjadi tinggi.

4.7.2 Void in Mix (VIM)

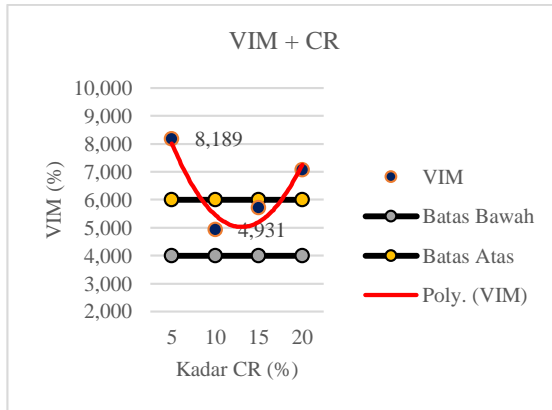
Void in Mix merupakan volume total udara yang berada diantara partikel agregat yang terselimuti aspal dalam suatu campuran yang telah dipadatkan, dinyatakan dengan persen volume bulk suatu campuran.

Adapun hasil Analisa nilai *Void in Mix (VIM)* dapat dilihat pada table berikut ini:

Tabel 4. 38 Nilai VIM dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Kadar CR	VIM	Spek.			Keterangan
1	NM1	5,00%	9,56	4	-	6	NO
2	NM3		6,35	4	-	6	NO
3	NM4		8,66	4	-	6	NO
Rata-Rata			8,189	4	-	6	NO
No	Kode Aspal	Kadar CR	VIM	Spek.			Keterangan
1	NM6	10,00%	4,64	4	-	6	OK
2	NM8		3,56	4	-	6	NO
3	NM9		6,60	4	-	6	NO
Rata-Rata			4,931	4	-	6	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	VIM	Spek.			Keterangan
1	NM12	15,00%	6,82	4	-	6	NO
2	NM13		4,93	4	-	6	OK
3	NM14		5,41	4	-	6	OK
Rata-Rata			5,722	4	-	6	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	VIM	Spek.			Keterangan
1	NM16	20,00%	7,45	4	-	6	NO
2	NM17		6,95	4	-	6	NO
3	NM20		6,84	4	-	6	NO
Rata-Rata			7,079	4	-	6	NO

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 10 Grafik Nilai VIM dengan Penambahan CR

Dari **Gambar 4.10** diatas dapat dilihat bahwa grafik nilai *VIM* mengalami penurunan pada kadar penambahan CR sebesar 10%, kemudian mengalami kenaikan kembali pada kadar penambahan CR sebesar 15% - 20%. Penurunan nilai *VIM* tersebut disebabkan oleh rongga rongga pada campuran semakin terisi oleh *Crumb Rubber*

Dengan rata – rata nilai *VIM* tertinggi yakni 8,189% terdapat pada benda uji dengan kadar CR 5%, sedangkan nilai *VIM* terendah yakni sebesar 4,931% terdapat pada benda uji dengan kadar CR 10%.

Sesuai spesifikasi Bina Marga, nilai *VIM* untuk Lataston adalah sebesar 4% - 6%. Maka nilai *VIM* yang memenuhi spesifikasi adalah kadar penambahan CR sebesar 10% - 15%.

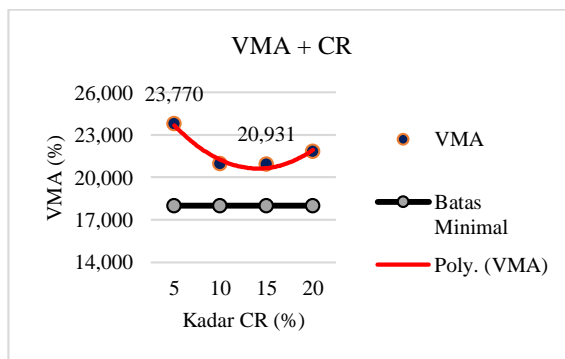
4.7.3 Void in Mineral Aggregate (VMA)

VMA atau rongga dalam mineral agregat merupakan volume rongga antar partikel agregat suatu campuran beraspal yang telah dipadatkan, yaitu rongga udara dan volume kadar aspal efektif yang dinyatakan terhadap volume total bena uji. Nilai *VMA* dinyatakan pada table dibawah ini:

Tabel 4. 39 Nilai VMA dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Kadar CR	VMA	Spek.	Keterangan
1	NM1	5,00%	24,91	18	OK
2	NM3		22,24	18	OK
3	NM4		24,16	18	OK
Rata-Rata			23,770	18	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	VMA	Spek.	Keterangan
1	NM6	10,00%	20,72	18	OK
2	NM8		19,82	18	OK
3	NM9		22,34	18	OK
Rata-Rata			20,959	18	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	VMA	Spek.	Keterangan
1	NM12	15,00%	21,85	18	OK
2	NM13		20,27	18	OK
3	NM14		20,67	18	OK
Rata-Rata			20,931	18	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	VMA	Spek.	Keterangan
1	NM16	20,00%	22,14	18	OK
2	NM17		21,72	18	OK
3	NM20		21,63	18	OK
Rata-Rata			21,827	18	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 11 Grafik Nilai VMA dengan Penambahan CR

Dari **Gambar 4.11** diatas dapat dilihat bahwa grafik nilai *VMA* mengalami penurunan nilai pada penambahan kadar CR sebesar 10%, lalu nilai *VMA* kembali naik pada penambahan kadar CR 15% - 20%. Nilai *VMA* tertinggi terdapat pada kadar CR 5% sebesar 23,77 %, sedangkan nilai rata – rata *VMA* terendah terdapat pada kadar CR 15%. yakni sebesar 20,93%.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan CR yang lebih tinggi dalam campuran menghasilkan *VMA* yang lebih rendah karena penggantian beberapa proporsi aspal dengan CR pada campuran HRS, menyebabkan rongga – rongga pada agregat menjadi terisi dengan aspal dan CR.

Dari hasil yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai rata – rata *VMA* telah memenuhi spesifikasi HRS-WC yakni lebih dari sama dengan 18%.

4.7.4 Void Filled with Asphalt (VFA)

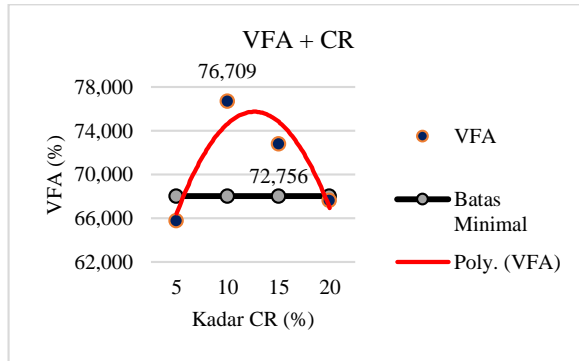
Menurut manual pekerjaan campuran beraspal panas, *VFA* adalah presentase rongga yang berada diantara partikel mineral agregat (*VMA*) yang terisi oleh aspal efektif. Adapaun hasil perhitungan *Void Filled with Asphalt (VFA)* dapat dilihat pada table dibawah ini:

Tabel 4. 40 Nilai VFA dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Kadar CR	VFA	Spek.	Keterangan
1	NM1	5,00%	61,62	68	NO
2	NM3		71,46	68	OK
3	NM4		64,16	68	NO
Rata-Rata			65,745	68	NO
No	Kode Aspal	Kadar CR	VFA	Spek.	Keterangan
1	NM6	10,00%	77,61	68	OK
2	NM8		82,04	68	OK
3	NM9		70,48	68	OK
Rata-Rata			76,709	68	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	VFA	Spek.	Keterangan
1	NM12	15,00%	68,80	68	OK
2	NM13		75,66	68	OK
3	NM14		73,81	68	OK
Rata-Rata			72,756	68	OK

No	Kode Aspal	Kadar CR	VFA	Spek.	Keterangan
1	NM16	20,00%	66,36	68	NO
2	NM17		68,01	68	OK
3	NM20		68,38	68	OK
Rata-Rata			67,579	68	NO

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 12 Grafik Nilai VFA dengan Penambahan CR

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa presentase rongga yang terisi aspal memiliki nilai puncak pada kadar penambahan CR sebesar 10%, lalu kemudian mengalami penurunan pada penambahan kadar CR yang lebih besar. Nilai rata – rata VFA terendah sebesar 65,74% dengan kadar CR 5%, sedangkan nilai rata – rata tertinggi sebesar 76,70% dengankadar CR 10%. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa penambahan kadar CR yang memenuhi spesifikasi VFA terdapat pada kadar CR 10% dan 15%.

Peningkatan nilai VFA pada kadar penambahan CR 10% - 15% terjadi karena campuran aspal + crumb rubber dapat menempel dan menyelimuti butiran agregat. Dengan demikian presentase rongga dalam campuran menjadi HRS menjadi rendah.

4.7.5 Stabilitas

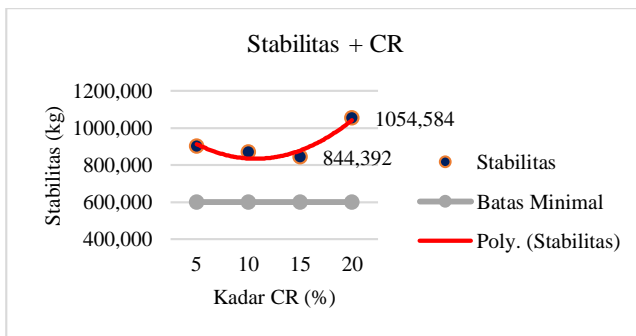
Menurut Sukirman, stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti

gelombang, alur, dan *bleeding*. Sesuai dengan hasil uji *marshall*, didapat stabilitas sebagai berikut:

Tabel 4. 41 Nilai Stabilitas dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Kadar CR	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	NM1	5,00%	945,864	600	OK
2	NM3		934,992	600	OK
3	NM4		826,272	600	OK
Rata-Rata			902,376	600	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	NM6	10,00%	674,064	600	OK
2	NM8		1043,712	600	OK
3	NM9		891,504	600	OK
Rata-Rata			869,760	600	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	NM12	15,00%	663,192	600	OK
2	NM13		869,760	600	OK
3	NM14		1000,224	600	OK
Rata-Rata			844,392	600	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	Stabilitas	Spek.	Keterangan
1	NM16	20,00%	1108,944	600	OK
2	NM17		1021,968	600	OK
3	NM20		1032,840	600	OK
Rata-Rata			1054,584	600	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 13 Grafik Nilai Stabilitas dengan Penambahan CR

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan nilai stabilitas yang drastis pada kadar penambahan crumb rubber 20% yaitu sebesar 1054,58 kg, dengan nilai rata – rata stabilitas terendah terdapat pada kadar penambahan CR 15% yakni sebesar 844,392 kg. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai rata – rata stabilitas telah memenuhi spesifikasi HRS-WC yakni tidak kurang dari 600 kg.

Menurut hasil penelitian (Satyagraha, 2018), nilai stabilitas akan bertambah seiring dengan penambahan kadar CR dalam campuran aspal.

Penelitian diatas cenderung sama dengan penelitian sebelumnya, yakni semakin tinggi kadar CR semakin tinggi juga nilai stabilitasnya, akan tetapi pada kadar karet 10% - 15% mengalami penurunan nilai stabilitas. Hal ini bisa disebabkan karena kadar karet yang terlalu tinggi yang bisa menyebabkan aspal tidak efektif dalam menyelimuti agregat.

4.7.6 Flow

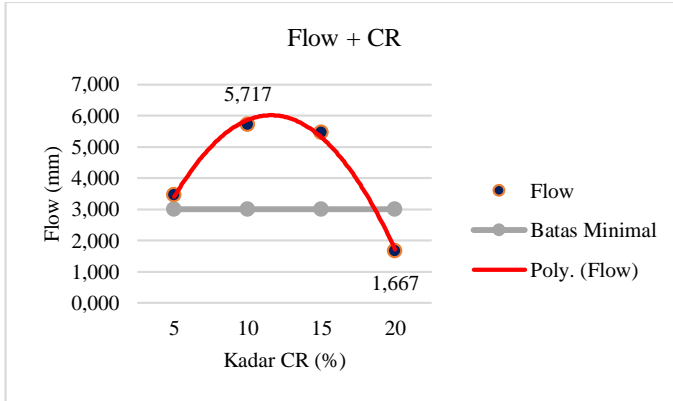
Menurut Departemen Pekerjaan Umum, *flow* merupakan besarnya perubahan bentuk plastis suatu benda uji campuran beraspal yang terjadi akibat suatu beban sampai batas keruntuhannya, dinyatakan dalam satuan panjang. Sesuai dengan hasil uji *marshall*, didapat nilai *flow* sebagai berikut:

Tabel 4. 42 Nilai *Flow* dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Kadar CR	Flow	Spek.	Keterangan
1	NM1	5,00%	2,98	3,00	NO
3	NM3		1,57	3,00	NO
4	NM4		5,80	3,00	OK
Rata-Rata			3,450	3,00	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	Flow	Spek.	Keterangan
1	NM6	10,00%	10,42	3,00	OK
3	NM8		2,00	3,00	NO
4	NM9		4,73	3,00	OK
Rata-Rata			5,717	3,00	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	Flow	Spek.	Keterangan
2	NM12	15,00%	7,43	3,00	OK
3	NM13		4,57	3,00	OK
4	NM14		4,36	3,00	OK
Rata-Rata			5,453	3,00	OK

No	Kode Aspal	Kadar CR	Flow	Spek.	Keterangan
1	NM16	20,00%	2,35	3,00	NO
2	NM17		1,15	3,00	NO
5	NM20		1,50	3,00	NO
Rata-Rata			1,667	3,00	NO

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 14 Grafik Nilai *Flow* dengan Penambahan CR

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *flow* mengalami kenaikan pada penambahan kadar CR 10% yakni dengan nilai 5,71 mm. dan setelah itu terjadi penurunan nilai *flow* yang drastis pada penambahan kadar CR 20% dengan nilai rata – rata 1,66 mm.

Menurut (Rahmawati et al., 2021) penurunan nilai *flow* dapat terjadi karena penggunaan crumb rubber pada campuran aspal meningkatkan nilai viskositas aspal dan kemampuan aspal untuk mengisi rongga rongga campuran, sehingga densitas campuran menjadi tinggi dan deformasi berkurang.

Sesuai spesifikasi Bina Marga, nilai *flow* untuk Lataston adalah lebih dari sama dengan 3 mm. Maka nilai *flow* yang memenuhi spesifikasi adalah kadar penambahan CR sebesar 5% - 15%.

4.7.7 Marshall Quotient (MQ)

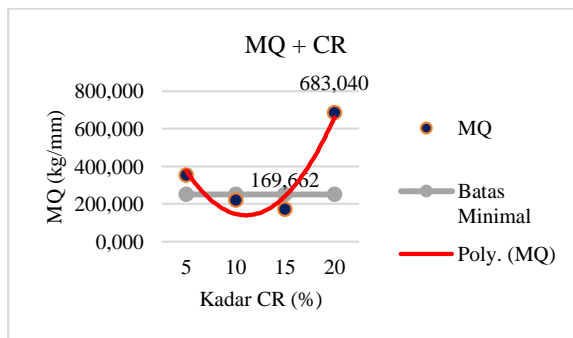
Marshall Quotient (MQ) adalah hasil bagi antara nilai stabilitas dan nilai *flow* dan dikenal sebagai indicator untuk menunjukkan nilai

kekakuan dan nilai fleksibilitas pada campuran aspal. sesuai perhitungan dan hasil tes uji *Marshall*, didapat nilai *Marshall Quotient* sebagai berikut :

Tabel 4. 43 Nilai MQ dengan Penambahan CR

No	Kode Aspal	Kadar CR	MQ	Spek.	Keterangan
1	NM1	5,00%	317,404	250	OK
3	NM3		595,536	250	OK
4	NM4		142,461	250	NO
Rata-Rata			351,800	250	OK
No	Kode Aspal	Kadar CR	MQ	Spek.	Keterangan
1	NM6	10,00%	64,68944	250	NO
3	NM8		521,856	250	OK
4	NM9		188,4786	250	NO
Rata-Rata			258,341	250	NO
No	Kode Aspal	Kadar CR	MQ	Spek.	Keterangan
2	NM12	15,00%	89,25868	250	NO
3	NM13		190,3195	250	NO
4	NM14		229,4092	250	NO
Rata-Rata			169,662	250	NO
No	Kode Aspal	Kadar CR	MQ	Spek.	Keterangan
1	NM16	20,00%	471,8911	250	OK
2	NM17		888,6678	250	OK
5	NM20		688,56	250	OK
Rata-Rata			683,040	250	OK

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 15 Grafik Nilai MQ dengan Penambahan CR

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai MQ mengalami penurunan nilai pada kadar penambahan CR 10% - 15% dengan setelah itu mengalami kenaikan nilai yang drastis pada penambahan kadar CR 20%. Nilai rata – rata MQ tertinggi terdapat pada kadar CR 20% yakni sebesar 683,04 kg/mm, dan nilai rata – rata terendah terdapat pada kadar CR 15% dengan nilai 169,66 kg/mm.

4.7.8 Kadar Crumb Rubber Optimum

Tabel 4. 44 Kadar Crumb Rubber Optimum

Parameter Aspal	Spesifikasi	Kadar Crumb Rubber (%)			
		5	10	15	20
Stabilitas	> 600 kg				
Flow	> 3 mm				
VIM	4% - 6%				
VFA	> 68%				
VMA	> 18%				
MQ	> 250 kg/mm				
Kadar Crumb Rubber Rencana (%)		5	10	15	20
Kadar Crumb Rubber Optimum		10,00%			

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berdasarkan hasil uji Marshall yang telah dilakukan, penambahan modifikasi crumb rubber HRS-WC dengan pencampuran basah, kadar crumb rubber yang memenuhi seluruh parameter Marshall adalah kadar crumb rubber 10%. Kadar crumb rubber tersebut akan digunakan sebagai acuan dalam pembuatan benda uji aspal dengan metode pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*.

4.8 Perencanaan Pembuatan Benda Uji *Indirect Tensile Strength (ITS)*

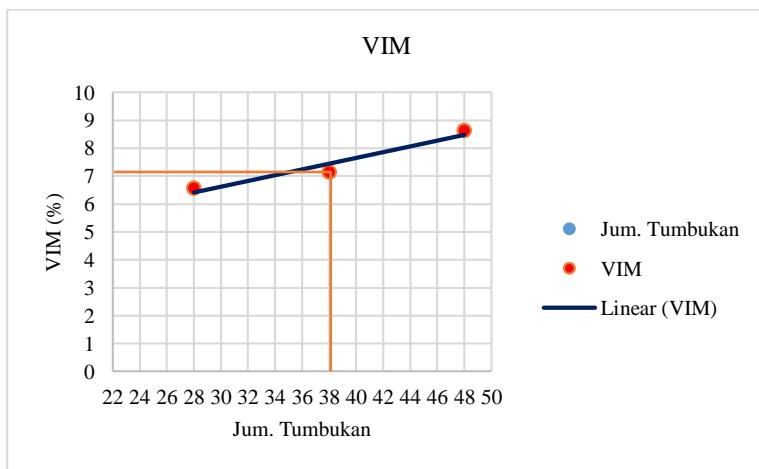
Perencanaan pembuatan benda uji *Indirect Tensile Strength (ITS)* dilakukan pada variasi *crumb rubber* 0% dan 10%. Benda uji ITS disyaratkan memiliki *VIM* sebesar $7\% \pm 0,5$. Untuk itu, dilakukan variasi tumbukan untuk memperoleh *VIM* yang sesuai. Perhitungan *VIM* dan penentuan jumlah tumbukan sesuai dengan Tabel

Tabel 4. 45 Pemilihan Tumbukan Benda Uji Konvensional

No	Variasi	Berat Kering	Berat Dalam Air	Berat SSD	BJ Campuran	VMA	VIM	VFA	Densitas
		gram	gram	gram	gram				
1	28	1170,6	682,3	1178,6	2,36	16,68	6,56	60,65	2,36
2	38	1192	691,5	1200	2,34	17,19	7,13	58,48	2,34
3	48	1181	677	1189	2,31	18,51	8,62	53,43	2,31

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Disini penulis menggunakan bantuan grafik untuk memperoleh *VIM* $7\% \pm 0,5$ sesuai grafik dibawah:

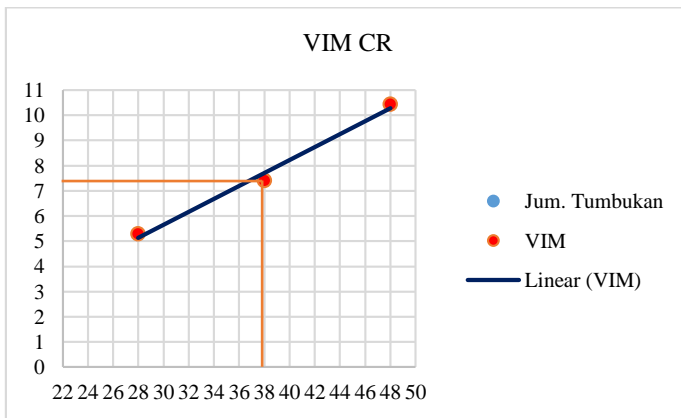


Gambar 4. 16 Grafik Pemilihan Tumbukan Benda Uji Konvensional

Tabel 4. 46 Pemilihan Tumbukan Benda Uji Modifikasi CR

No	Variasi	Berat Kering	Berat Dalam Air	Berat SSD	BJ Campuran	VMA	VIM	VFA	Densitas
		gram	gram	gram	gram				
1	28	1194,6	708	1202,6	2,42	14,73	5,27	64,19	2,42
2	38	1184	690,5	1192	2,36	16,65	7,40	55,51	2,36
3	48	1190	677	1198	2,28	19,36	10,42	46,18	2,28

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 17 Grafik Pemilihan Tumbukan Benda Uji Modifikasi CR

4.9 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* pada Campuran Kadar Aspal Optimum & Modifikasi Crumb Rubber

Indirect Tensile Strength Test adalah suatu metode untuk mengetahui nilai gaya tarik dari *asphalt concrete*. Sifat uji ini adalah kegagalan gaya tarik yang berguna untuk memperkirakan potensial retakan. Pengujian gaya tarik tidak langsung secara normal dilaksanakan menggunakan *Marshall* yang telah dimodifikasi dengan plat berbentuk cekung dengan lebar 12,5 mm pada bagian penekan *Marshall*. Pada penelitian ini sample benda uji dibuat sebanyak 12 benda uji, 3 untuk pengujian kering dan 3 untuk pengujian setelah pengondisian pada setiap campuran KAO dan Modifikasi

4.9.1 ITS Dry

Dalam pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* terdapat 2 pengondisian benda uji, dimana salah satunya adalah pengondisian benda uji kering atau *ITS Dry*. Berikut akan dijelaskan mengenai langkah-langkah pengujian *ITS Dry*:

1. Setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan ukurlah ketebalan (t) serta diameter (D) benda uji, kemudian benda uji disimpan selama (24 ± 3) jam pada temperature ruangan.
2. Setelah pemeraman, benda uji harus dibungkus dengan plastic atau dimasukkan kantong plastic yang kuat dan tidak bocor, kemudian benda uji ini direndam dalam bak perendaman selama 2 jam \pm 10 menit pada temperature ($25 \pm 0,5$) °C dengan ketinggian air minimum 25 mm diatas permukaan benda uji
3. Kemudian dilakukan pengujian dan catat hasil bacaan mesinnya.

Adapun hasil analisa nilai kekuatan tarik *ITS Dry* dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 4. 47 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Dry 0% CR

No	P	D	t	ITS D
1	3922	100	70,0	356,55
2	3549	100	70,0	322,64
3	2549	100	70,0	231,73
Rata - rata				303,61

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 48 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Dry 10% CR

No	P	D	t	ITS D
1	7141	100	68,0	668,28
2	5297	100	68,0	495,71
3	5997	100	68,0	561,22
Rata - rata				575,07

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Pengujian kekuatan tarik tak langsung (*Indirect Tensile Strength*) dilakukan dengan memberikan beban dengan kecepatan konstan yaitu sebesar 50 mm per menit, beban diberikan sepanjang diameter dari benda

uji. Dari hasil uji ini didapatkan nilai kuat tekan maksimum yang tercatat pada mesin pengujian. Berikut adalah contoh perhitungan kuat tarik ITS pada benda uji No.1 pada campuran 0% CR:

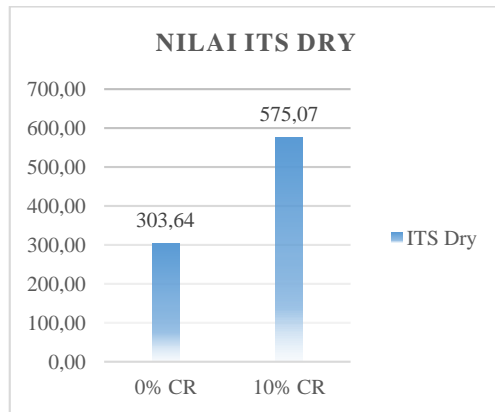
$$St = \frac{2000P}{\pi t D}$$

$$St = \frac{2000 (3,922 \times 1000)}{\left(\frac{22}{7}\right) (7 \times 10) (10 \times 10)}$$

$$= 356,55 \text{ kPa}$$

Keterangan:

- St = Kekuatan Tarik, kPa
 P = Beban Maksimum, N
 t = Tebal Benda Uji, mm
 D = Diameter Benda Uji, mm



Gambar 4. 18 Diagram Nilai Kekuatan Tarik ITS *Dry* 0% CR & 10% CR

Dari grafik batang di atas, dapat dilihat bahwa nilai kuat tarik tidak langsung pada penambahan 10% *crumb rubber* lebih besar dari perkerasan konvensional. Kenaikan yang dicapai sebesar 89%.

4.9.2 *ITS Wet*

Berikut akan dijelaskan mengenai langkah-langkah pengujian *ITS*

Wet:

1. Dalam pengondisian benda uji basah atau *ITS Wet*, setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan dan disimpan selama (24 ± 3) jam pada temperature ruangan, ukurlah ketebalan (t) dan diameter (D) setiap benda uji kemudian catat.
2. Setelah itu timbang berat benda uji kering di udara (A), catat
3. Kemudian lakukan penjemuran dibawah sinar matahari pada benda uji selama 25 menit, lalu hair dryer benda uji selama 25 menit
4. Setelah itu, benda uji direndam pada bak perendam yang berisi air pada temperature (60 ± 1) °C selama 36 jam. Ketinggian air minimum 25 mm diatas permukaan benda uji.
5. Setelah perendaman selama 36 jam didalam bak perendam (60 ± 1) °C, pindahkan benda uji kemudian direndam pada bak perendam yang mempunyai temperature $(25 \pm 0,5)$ °C selama 2 jam \pm 10 menit. Ketinggian air minimum 25 mm diatas permukaan benda uji.
6. Kemudian hitung derajat kejenuhan (S')
7. Lalu lakukan pengujian pada benda uji dan catat hasil bacaan mesinnya.

Adapun hasil perhitungan derajat kejenuhan (S') dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 4. 49 Hasil Nilai Derajat Kejenuhan (S') 0% CR

No	Pa(%)	E	Va	B'	A	J'	S(%)
1	7,16	5500	39,38	1220,8	1190,8	30	76,18
2	7,11	5500	39,11	1224,2	1193,8	30,4	77,74
3	7,07	5500	38,89	1216,8	1188,8	28	72,01

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 50 Hasil Nilai Derajat Kejenuhan (S') 10% CR

No	Pa(%)	E	Va	B'	A	J'	S'
1	7,2	5342,86	38,47	1218,8	1189,8	29	75,39
2	7,12	5342,86	38,04	1217,8	1188,8	29	76,23
3	7,19	5342,86	38,42	1225,8	1197,8	28	72,89

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan derajat kejenuhan (S') pada benda uji No.1 pada campuran 10% CR:

- Pertama hitung volume rongga udara (Va) mengikuti persamaan dibawah ini:

$$Va = \frac{PaE}{100} = \frac{7,2 (5342,86)}{100}$$

$$= 38,47 \text{ cm}^3$$

- Lalu setelah mendapat nilai (Va), hitung volume air yang diserap oleh benda uji dengan persamaan berikut:

$$J' = B' - A = 1218 - 1189,8$$

$$= 29 \text{ cm}^3$$

- Kemudian hitung derajat kejenuhan (S') dengan membandingkan volume air yang diserap benda uji dengan volume rongga udara (Va) dengan persamaan sebagai berikut:

$$S' = \frac{100J'}{Va} = \frac{100(29)}{38,47}$$

$$= 75,39 \%$$

Keterangan:

Va = Volume Rongga Udara, cm³

Pa = Rongga Udara, %

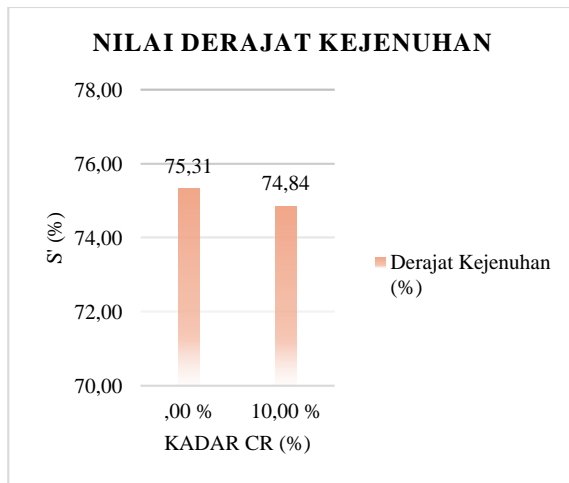
E = Volume Benda Uji, cm³

J' = Volume Air yang diserap, cm^3

B' = Berat Benda Uji Kering Permukaan Setelah Perendaman, g

A = Berat Benda Uji di Udara, g

S' = Derajat Kejenuhan, %



Gambar 4. 19 Diagram Nilai Derajat Kejenuhan (S') 0% CR & 10% CR

Nilai derajat kejenuhan terletak antara dari 70% dan 80%, apabila derajat kejenuhan lebih besar dari 80% seharusnya benda uji sudah hancur dan dibuang. Pada grafik batang diatas, dapat dilihat bahwa kedua nilai memenuhi standar spesifikasi yang sudah ditentukan.

Setelah dilakukan perhitungan derajat kejenuhan adapun hasil analisa nilai kekuatan tarik *ITS Wet* dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 4. 51 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Wet 0% CR

No	P	D	t	ITS W
1	3111	100	70,0	282,82
2	3012	100	70,0	273,82
3	2412	100	70,0	219,27
Rata - rata				258,64

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 52 Hasil Nilai Kekuatan Tarik ITS Wet 10% CR

No	P	D	t	ITS W
1	6537	100	68,0	611,75
2	4634	100	68,0	433,66
3	5084	100	68,0	475,78
Rata - rata				507,06

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan kuat tarik ITS pada benda uji No.1 pada campuran 10% CR:

$$St = \frac{2000P}{\pi t D}$$

$$St = \frac{2000 (6,537 \times 1000)}{\left(\frac{22}{7}\right) (6,8 \times 10) (10 \times 10)}$$

$$= 611,75 \text{ kPa}$$

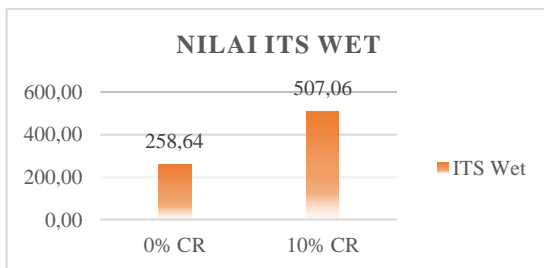
Keterangan:

St = Kekuatan Tarik, kPa

P = Beban Maksimum, N

t = Tebal Benda Uji, mm

D = Diameter Benda Uji, mm



Gambar 4. 20 Diagram Nilai Kekuatan Tarik ITS Wet 0% CR & 10% CR

Dari grafik batang di atas, dapat dilihat bahwa nilai uji *ITS WET* pada penambahan 10% *crumb rubber* lebih besar dari perkerasan konvensional.

4.9.3 ITS Ratio

Rasio kekuatan tarik (RKT) atau tensile strength ratio (TSR) dihitung sebagai berikut:

$$RKT \text{ atau } TSR = \frac{S2}{S1}$$

Keterangan:

S1 = Kekuatan tarik rata – rata dari contoh ITS Dry, kPa

S2 = Kekuatan tarik rata – rata dari contoh ITS Wet, kPa

Adapun hasil perhitungan rasio kekuatan tarik (RTK) atau *tensile strength ratio* (TSR) dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 4. 53 Hasil Perhitungan Rasio Pengujian ITS 0% CR

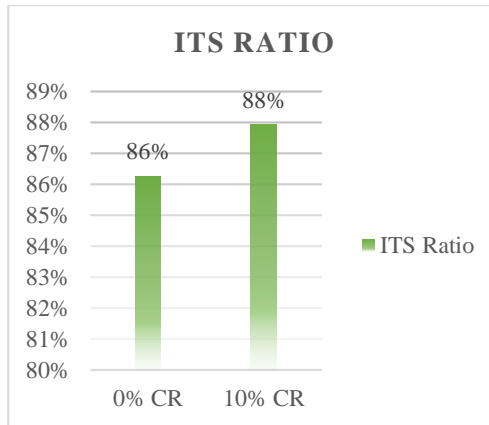
No	ITS D	ITS W	ITS R
1	357 Kpa	283 Kpa	79%
2	323 Kpa	274 Kpa	85%
3	232 Kpa	219 Kpa	95%
Rata - rata			86%

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Tabel 4. 54 Hasil Perhitungan Rasio Pengujian ITS 10% CR

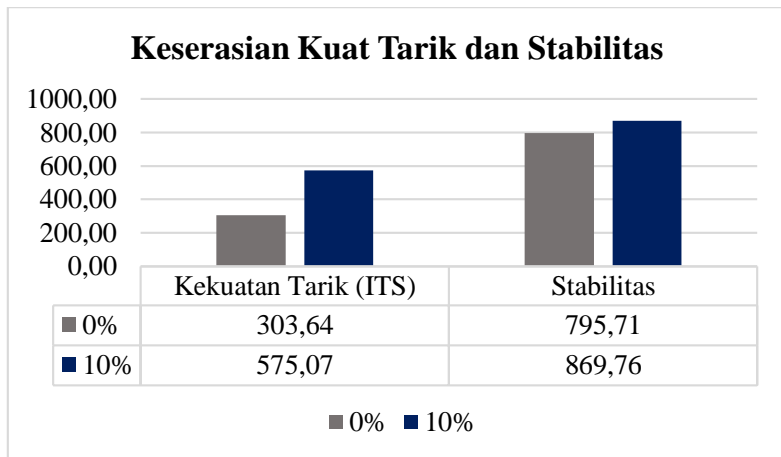
No	ITS D	ITS W	ITS R
1	668 Kpa	612 Kpa	92%
2	496 Kpa	434 Kpa	87%
3	561 Kpa	476 Kpa	85%
Rata - rata			88%

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4. 21 Diagram Nilai Rasio Pengujian ITS 0% CR & 10% CR

4.9.4 Keserasian Hasil Kuat Tarik dan Stabilitas



Gambar 4. 22 Keserasian Peningkatan Nilai Kuat Tarik dan Stabilitas

Dari **Gambar 4.22.** dapat dilihat bahwa nilai kuat tarik dan stabilitas perkerasan mengalami kenaikan setelah penambahan *crumb rubber* sebesar 10%.

4.10 Perbandingan Harga Campuran Aspal

Parameter perbandingan penelitian ini adalah dari segi Rencana Anggaran Biaya (RAB). Dalam hal ini akan dibandingkan antara anggaran biaya harga campuran aspal konvensional (tanpa campuran Modifikasi *Crumb Rubber*) dan campuran dengan Modifikasi *Crumb Rubber*.

Anggaran biaya yang akan dibahas disini mengacu pada HSPK Surabaya tahun 2020. Hasil perbandingan harga untuk campuran Lataston Konvensional dan Modifikasi dapat dilihat pada table dibawah ini:

A. Campuran Konvensional

Tabel 4. 55 Anggaran Biaya Lataston Konvensional

Konvensional			
Panjang	=	10	m
Lebar	=	9	m
Tebal	=	0,03	m
Volume	=	1	m ³
Bj Perkerasan	=	2,40	t/m ³
Kebutuhan	=	2,40	ton
Harga HSPK	=	Rp 1.044.356	
Harga Perkerasan	=	Rp 2.506.416	/m ³
Total Harga	=	Rp 2.506.416	/m³

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan RAB perkerasan konvensional:

- Kebutuhan Non-CR (Konvensional)
 = Volume x BJ. Perkerasan Aspal (KAO)
 = 1 m³ x 2,4 t/m³
 = 2,4 t/m³
- Harga Perkerasan Non-CR (Konvensional)
 = Harga HSPK x Kebutuhan
 = Rp 1.044.356 x 2,4 t/m³
 = Rp 2.506.416 m³
- Total Harga Perkerasan
 = Harga Perkerasan / Volume
 = Rp 2.506.416 m³ / 1 m³
 = **Rp 2.506.416/m³**

B. Campuran Modifikasi

Tabel 4. 56 Anggaran Biaya Lataston Modifikasi

Modifikasi			
Panjang	=	10	m
Lebar	=	9	m
Tebal	=	0,03	m
Volume	=	1	m ³
Bj Perkerasan	=	2,38	t/m ³
Kebutuhan	=	2,38	ton
Kebutuhan Crumb Rubber	=	0,24	ton
Harga HSPK	=	Rp 1.044.356	
Harga Perkerasan	=	Rp 2.465.093	
Harga CR	=	Rp 95.177	
Total Harga	=	Rp 2.560.270	/m³

Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Berikut adalah contoh perhitungan RAB perkerasan modifikasi:

- Kebutuhan (Modifikasi)
 $= \text{Volume} \times \text{BJ. Perkerasan Aspal (CR 10\%)}$
 $= 1 \text{ m}^3 \times 2,38 \text{ t/m}^3$
 $= 2,38 \text{ t/m}^3$
- Kebutuhan *Crumb Rubber*
 $= \text{Volume} \times \text{Kadar CR Optimum (\%)} \times \text{BJ. Perkerasan Aspal (CR 10\%)}$
 $= 1 \text{ m}^3 \times 10\% \times 2,38 \text{ t/m}^3$
 $= 0,24 \text{ ton}$
- Harga Perkerasan (Modifikasi)
 $= (\text{BJ. Perkerasan Aspal (CR 10\%)} - (0,8\% \times \text{BJ. Perkerasan Aspal (CR 10\%)})) \times \text{Harga HSPK}$
 $= (2,38 \text{ t/m}^3 - (0,8\% \times 2,38 \text{ t/m}^3)) \times \text{Rp } 1.044.356$
 $= \text{Rp } 2.465.093$

- Harga *Crumb Rubber*
 $= (0,8\%) \times \text{BJ. Perkerasan Aspal (CR 10\%)} \times 5000 \times 1000$
 $= \text{Rp } 95.177$
- Total Harga Perkerasan
 $= \text{Harga Perkerasan} + \text{Harga } \textit{Crumb Rubber}$
 $= \text{Rp } 2.465.093 + \text{Rp } 95.177$
 $= \text{Rp } \mathbf{2.560.270/m^3}$

Setelah diketahui total anggaran biaya untuk masing – masing campuran, dilakukan perhitungan selisih biaya antar campuran.

Selisih Harga

$$= \text{Total Campuran Konvensional} - \text{Total Harga Campuran Modifikasi}$$

$$= \text{Rp } 2.506.416/m^3 - \text{Rp } 2.560.270/m^3$$

$$= \mathbf{\text{Rp } 53.854/m^3}$$

$$= \mathbf{2,15\%}$$

Untuk perhitungan penambahan kapasitas akan dijabarkan sebagai berikut:

Kapasitas:

$$= (\text{Nilai Stabilitas Campuran CR Optimum} - \text{Nilai Stabilitas Campuran KAO}) / \text{Nilai Stabilitas Campuran KAO}$$

$$= (870 \text{ kg} - 796 \text{ kg}) / 796 \text{ kg}$$

$$= \mathbf{9\%}$$

Berdasarkan penjabaran perhitungan diatas dapat diketahui bahwa dengan penambahan Modifikasi CR sebanyak **10%** dari total berat rencana kadar aspal optimum ada perbedaan biaya sebanyak **Rp 53.854/m³**,

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian yang mencakup pemeriksaan material, pembuatan benda uji hingga pengujian *Marshall* benda uji tanpa penambahan modifikasi *crumb rubber*, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Campuran aspal pada Lataston Lapis Aus (*HRS – WC*) yang memenuhi sebagian besar parameter *Marshall* berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 merupakan campuran aspal dengan kadar aspal optimum 7,89%
2. Berdasarkan pengujian karakteristik aspal, aspal modifikasi *crumb rubber* memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi ditinjau dari hasil pengujian titik lembek dengan nilai 53 °C – 73 °C. namun memiliki nilai penetrasi yang rendah sehingga aspal ini akan getas apabila berada di wilayah yang bersuhu dingin, dengan hasil penurunan sebesar 56,99 – 23,33.
3. Campuran aspal pada campuran modifikasi *hot rolled sheet – wearing course* dengan penambahan *crumb rubber* menggunakan metode basah (*wet process*) menghasilkan nilai pada beberapa karakteristik *marshall* yang cukup baik, diantaranya adalah nilai densitas, stabilitas, *marshall quotient*, *VIM*, dan *VMA* yang mana memiliki trend grafik dengan garis regresi yang meningkat. Nilai stabilitas sendiri meningkat menjadi 9% dari stabilitas campuran aspal konvensional. Sedangkan untuk parameter nilai *flow* dan *VFA* memiliki trend grafik dengan garis regresi yang menurun. Dari hasil tersebut campuran *HRS-WC* dengan penambahan modifikasi *crumb rubber* yang memenuhi sebagian besar parameter spesifikasi Bina Marga 2018 yakni campuran *HRS – WC* dengan kadar *crumb rubber* 10%.
4. Hasil pengujian *Indirect Tensile Strength* ditinjau dari 3 nilai parameter pada setiap campuran aspal KAO dan aspal modifikasi CR diantaranya adalah nilai *ITS Dry*, *ITS Wet*, dan *ITS Ratio*. Untuk *ITS Dry* dengan nilai kuat tarik sebesar 303,64 kPa untuk campuran aspal KAO dan 575,07 kPa untuk campuran aspal modifikasi CR. *ITS Wet* dengan hasil kuat tarik sebesar 258,64 kPa untuk campuran

aspal KAO dan 507,06 kPa untuk campuran aspal modifikasi CR. Pada parameter nilai *ITS Ratio*, nilai untuk campuran aspal modifikasi CR lebih tinggi dengan nilai 88 % dibandingkan dengan campuran aspal KAO. Hal ini mengindikasikan bahwa campuran aspal modifikasi CR lebih tahan terhadap air dan juga potensi kerusakan yang ditimbulkan.

5. Nilai keserasian antara kuat tarik (*ITS*) dan stabilitas *marshall* mengalami kenaikan setelah adanya penambahan kadar *crumb rubber* sebesar 10%

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk material *crumb rubber* nya itu sendiri terutama dari segi karakteristik material
2. Melakukan penelitian lanjutan dengan penambahan variasi kadar *crumb rubber* yang lebih variative, agar dapat diketahui secara teliti penggunaan modifikasi *crumb rubber* yang paling optimum.
3. Penelitian lanjutan berupa pengujian dengan pencampuran metode kering (*Dry Process*) dan metode semi basah (*Semi – Wet Process*) untuk mengetahui hasil perbandingan antara metode basah (*Wet Process*) dengan metode kering (*Dry Process*) dan metode semi basah (*Semi – Wet Process*).
4. Mengingat penelitian ini dilakukan dengan yang relative singkat karena adanya pandemic Covid-19, sehingga menyebabkan kondisi ideal tidak bisa dilakukan. Maka, disarankan untuk melakukan pengujian ITS pada semua kadar penambahan *crumb rubber* untuk melihat keserasiannya dengan hasil uji *Marshall*

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, B., & Maiti, S. (2000). *1-s2.0-S007967000000204-main.pdf*. 25(March), 909–948.
- Tesis Leily I-IV*, 1–70. http://eprints.undip.ac.id/38369/2/Tesis_Leily_I-IV_20_Des_2012_Revisi_Sid_3_NEW.pdf
- Boedi Rahardjo, N. (2017). Kinerja Campuran Hot Rolled Sheet-Wearing Course (Hrs-Wc) Dengan Filler Abu Ampas Tebu. *Bangunan*, 22(2), 11–20.
- Candra, P. R., & Siswanto, H. (2019). *Marshall Characteristics of Asphalt Concrete Wearing Course Using Crumb Rubber Modified of Motorcycle Tire Waste As Additive*. 961(50), 57–61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.961.57>
- Palit, S. K., Reddy, K. S., & Pandey, B. B. (2004). *Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes*. 16(1), 45–53.
- Pratama Ilyas, M. A., Setyawan, A., & Djumari, D. (2019). Karakteristik Marshall Dan Stiffness Modulus Pada Lapis Tipis Campuran Aspal Panas Dengan Penambahan Crumb Rubber. *Matriks Teknik Sipil*, 7(4), 408–414. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v7i4.38479>
- Purnomo, W., Evaldo, B., & Suparma, L. B. (2014). *Pemanfaatan crumb rubber (serbuk karet roda)*. 22–24.
- Rahmawati, A., Setiawan, D., & Nudianti, N. T. (2021). Effect of Tropical Natural Rubber on the Hot Rolled Sheet (HRS) Wearing Course. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1144(1), 012085. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1144/1/012085>
- Satyagraha, F. (2018). *PENGARUH PENAMBAHAN LIMBAH BAN DALAM BEKAS KENDARAAN DAN FILLER LIMBAH KARBIT PAA LASTON (AC-BC) TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL*. 21, 1–9.

- Siswanto, H., Supriyanto, B., Pranoto, Chandra, P. R., & Hakim, A. R. (2017). Marshall properties of asphalt concrete using crumb rubber modified of motorcycle tire waste. *AIP Conference Proceedings*, 1887, 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.5003522>
- Takallou, M. B. (n.d.). *Benefits of Recycling Waste Tires In Rubber Asphalt Paving*. 87–92.
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2017). Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture. *Procedia Engineering*, 171, 1384–1389. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.451>

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Maharamilia Nedia Rizky. Lahir di Samarinda, 17 April 1999, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Sevilla Al – Jazeera, SD Islam Bunga Bangsa (SDIBB) Samarinda, SMPN 13 Kota Tangerang, SMAN 3 Kota Tangerang. Setelah menempuh pendidikan SMA, penulis melanjutkan pendidikan di jurusan D-IV Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember menyelesaikan Tugas Akhir program D-IV

mengambil judul **“KARAKTERISTIK MARSHALL PADA PEMANFAATAN MODIFIKASI CRUMB RUBBER DARI LIMBAH BAN KENDARAAN PADA CAMPURAN HOT ROLLED SHEET – WEARING COURSE (HRS – WC)”**.

Selain aktif dalam perkuliahan, penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan, organisasi, dan pelatihan di kampus diantaranya menjadi Staff Divisi Ekternal BEM Fakultas Vokasi Kabinet Asgardian 2018/2019, Staff Divisi Kominfo BEM ITS Kabinet Kolaborasi 2019/2020, dan kepanitiaan seperti GERIGI ITS 2018, D’Village 8th dan 9th. Saat kuliah penulis juga pernah mengikuti kegiatan magang di PT. Tatamulia Nusantara Indah dalam pembangunan Gedung KCU BCA Surabaya pada tahun 2020. Bagi pembaca yang ingin berdiskusi, memberikan kritik ataupun saran dapat melalui email maharamilia_nedia@yahoo.co.id

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan ini, saya Maharamilia Nedia Rizky ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan hidayah dan karunia Nya, berupa tambahan ilmu dan semangat sehingga tugas akhir terapan ini dapat diselesaikan
2. Kedua orang tua saya, Bapak Rusliansyah dan Ibu Rianingsih, serta 2 adik saya Nadira Azmiy F.R., dan Nadin Karimah Rizky yang selalu memberikan support, doa restu dan juga selalu ada disegala kondisi saya.
3. Bapak Ir. Rachmad Basuki, MS, Bapak Dr. Ir. Machsus, ST., MT., dan Ibu Amalia Firdaus Mawardi, ST., MT. yang telah membimbing dan memberi ilmu kepada saya selama penelitian aspal berlangsung, sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan
4. Teman – teman penelitian aspal Modifikasi 2020/2021 Andra, Henny, Shania, Uul, dan Adit
5. Teman – teman sepermainan saya semasa kuliah yaitu Andra, Cita, Salsa, Dinda, Cindy, Della, Nabila yang selalu membantu, menghibur, dan meramaikan masa perkuliahan saya di DTIS.
6. Teman – teman DS38, terkhusus teman – teman A17 DTIS yang telah berjuang bersama dari awal hingga akhir.
7. Dan juga terimakasih kepada semua pihak – pihak yang telah memberikan support kepada saya dalam pengerjaan tugas akhir ini
8. Last but not least, I wanna thank me, for believing in me, for doing all this hard work, for having no days off, for never quitting, and for just being me all this time.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Gambar 1. Pengujian Agregat

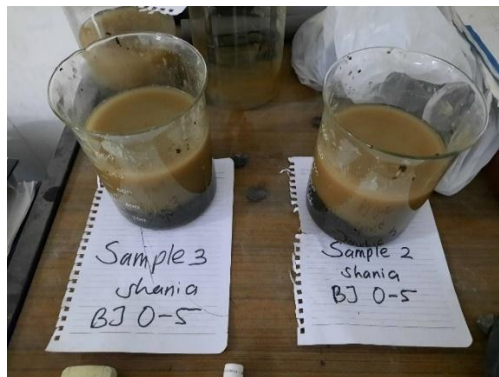
Gambar 1.a Proses Analisa Ayakan



Gambar 1.b Proses Berat Jenis Agregat



Gambar 1.c Proses Penyerapan Agregat terhadap Air



Gambar 1.d Proses Kelekatan Agregat terhadap Aspal



Gambar 1.e Proses Keausan Agregat



Gambar 2. Pengujian Aspal

Gambar 2.a Pengujian Titik Lembek Aspal



Gambar 2.b Pengujian Penetrasi Aspal



Gambar 2.c Pengujian Berat Jenis Aspal



Gambar 2.d Pengujian Daktilitas Aspal



Gambar 2.e *Pengujian Kehilangan Berat Aspal*



Gambar 3. Pembuatan Benda Uji

Gambar 3.a *Material Crumb Rubber untuk pembuatan benda uji*



Gambar 3.b Penimbangan agregat sesuai dengan Variasi



Gambar 3.c Pemanasan Agregat dan Aspal diatas kompor



Gambar 3.d Pencampuran Aspal dengan Crumb Rubber sampai homogen



Gambar 3.d Pencampuran Aspal + Crumb Rubber yang sudah homogen dengan Agregat



Gambar 3.d Proses pembuatan benda uji



Gambar 3.e Pematatan benda uji menggunakan alat compactor



Gambar 3.f Extrude benda uji, penimbangan berat kering, dan perendaman



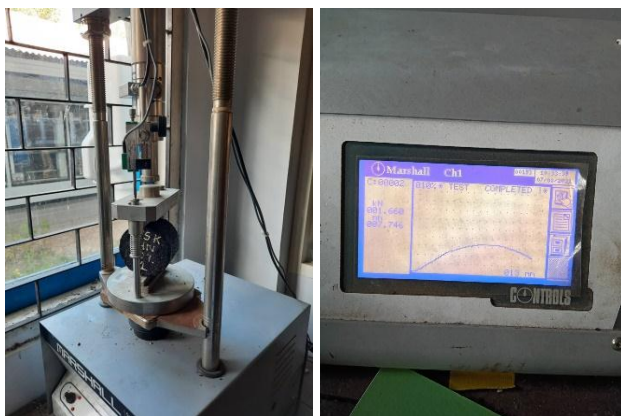
Gambar 3.f Penimbangan berat dalam air dan berat SSD



Gambar 3.f Perendaman dalam waterbath dan pengujian Marshall



Gambar 3.g Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS)



Tabel 1. Log Book

No	Tanggal	Jenis Kegiatan	Ket.
1	17 Maret 2021	Briefing kegiatan laboratorium untuk uji agregat	
2	18 Maret 2021	Briefing kegiatan laboratorium untuk uji aspal	
3	24 Maret 2021	Uji penetrasi, analisa saringan agregat 10/10 dan perendaman dalam air	
4	26 Maret 2021	Uji titik nyala, titik bakar, dan titik lembek aspal	
5	27 Maret 2021	Uji berat jenis aspal dan abrasi agregat	
6	28 Maret 2021	Analisa ayakan 5/10 dan perendaaman dalam air	
7	29 Maret 2021	Uji berat jenis agregat 10/10	
8	30 Maret 2021	Uji analisa saringan agregat 0/5 dan berat jenis aspal	
9	03 April 2021	Uji berat jenis agregat 5/10	
10	04 April 2021	Uji berat jenis agregat 0/5	
11	05 April 2021	Uji analisa saringan serbuk besi	
12	07 April 2021	Uji kelekatan aspal pada agregat	
13	12 April 2021	Uji Karakteristik Aspal Crumb Rubber	
14	16 April 2021	Uji Karakteristik Aspal Crumb Rubber	
15	20 April 2021	Blending agregat	
16	25 Mei 2021	Pembuatan benda uji untuk KAO	
17	2 Juni 2021	Pengujian Marshall Otomatis	Mngetahui kerusakan alat

18	13 Juni 2021	Pengujian Marshall manual	
19	18 Juni 2021	Pengujian Marshall di Departemen Teknik Sipil ITS	
20	19 Juni 2021	Analisa hasil uji Marshall	
21	22 Juni 2021	Penentuan KAO	
23	30 Juni 2021	Pembuatan benda uji untuk modifikasi, perendaman dalam air	
24	1 Juli 2021	Pembuatan benda uji untuk modifikasi, perendaman dalam air	
25	2 Juli 2021	Uji Marshall benda uji modifikasi	
26	3 Agustus 2021	Pembuatan benda uji dengan variasi tumbukan	
27	4 Agustus 2021	Pembuatan benda uji dengan ITS	
28	5 Agustus 2021	Pengujian ITS Kering	
29	6 Agustus 2021	Pengujian ITS Basah	