TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH *STYROFOAM* SEBAGAI BAHAN TAMBAH ASPAL PEN 60/70 PADA CAMPURAN *SUPERPAVE*

(*ANALYSIS OF THE EFFECT OF USING STYROFOAM WASTE AS ADDITIVE MATERIAL ASPHALT BINDING MATERIAL PEN 60/70 IN SUPERPAVE MIXTURE*)

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

Muhammad Fathan Ariefka Ahnaf

21511012

PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2025

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH *STYROFOAM* SEBAGAI BAHAN TAMBAH ASPAL PEN 60/70 PADA CAMPURAN *SUPERPAVE*

(*ANALYSIS OF THE EFFECT OF USING STYROFOAM WASTE AS ADDITIVE MATERIAL ASPHALT BINDING MATERIAL PEN 60/70 IN SUPERPAVE MIXTURE*)

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

Muhammad Fathan Ariefka Ahnaf

21511012

Disetujui:

Pembimbing

Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Tanggal: 12 Desember 2025

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH *STYROFOAM* SEBAGAI BAHAN TAMBAH ASPAL PEN 60/70 PADA CAMPURAN *SUPERPAVE*

(*ANALYSIS OF THE EFFECT OF USING STYROFOAM WASTE AS ADDITIVE MATERIAL ASPHALT BINDING MATERIAL PEN 60/70 IN SUPERPAVE MIXTURE*)

Disusun Oleh:

Muhammad Fathan Ariefka Ahnaf
21511012

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

Diuji pada tanggal 28 November 2025

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP	**Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D**	**Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng.**
NIK: 215111307	**NIK: 955110103**	**NIK: 165110105**

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Yunalia Muntafi., S.T., M.T., Ph.D. (Eng.) IPM
NIK: 955110103

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tugas Akhir ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri, yang disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan akademik pada Program Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Segala kutipan, data, maupun pendapat yang berasal dari karya orang lain telah saya cantumkan secara lengkap dan sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari ditemukan bahwa sebagian atau seluruh isi laporan ini bukan merupakan karya asli saya, atau terdapat unsur plagiarisme, maka saya bersedia menerima segala bentuk konsekuensi sesuai ketentuan akademik dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 15 November 2025
Pembuat Pernyataan



Muhammad Fathan Arielka Ahnaf
NIM: 21511012

DEDIKASI

Alhamdulillahirabbil'alamin.

"Dengan penuh rasa syukur, saya mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan dari orang-orang tercinta sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Sebagai wujud rasa syukur dan kebahagiaan, karya ini saya persembahkan kepada:

Allah SWT

Atas izin, pertolongan, dan kasih sayang-Nya, skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan mengabulkan setiap doa yang saya panjatkan."

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah *Styrofoam* Sebagai Bahan Tambah Aspal Pen 60/70 Pada Campuran *Superpave* **(***Analysis Of The Effect Of Using Styrofoam Waste As Additive Material Asphalt Binding Material Pen 60/70 In Superpave Mixture*)" dapat diselesaikan dengan baik. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademik untuk menuntaskan studi program sarjana pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menghadapi berbagai kendala. Namun, berkat saran, masukan, serta dukungan dari banyak pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini akhirnya dapat diselesaikan. Sehubungan dengan itu, penulis ingin menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa membimbing dan memberikan arahan kepada penulis selama penyusunan Tugas Akhir ini
2. Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Penguji Tugas Akhir I yang telah memberikan saran dan koreksi sehingga tugas akhir ini menjadi lebih baik.
3. Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng., selaku Dosen Penguji Tugas Akhir II yang telah memberikan saran dan koreksi sehingga tugas akhir ini menjadi lebih baik.
4. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng)., IPM selaku Kepala Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Pranoto, Bapak Sukamto dan Mas Giri Widhiatmoko selaku laboran Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan yang telah banyak membantu penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir.
6. Kedua orang tua tercinta, Ayah dan Ibu, yang selalu menjadi sumber kekuatan,

doa, dan inspirasi. Terima kasih atas kasih sayang, dukungan tanpa syarat, serta doa yang tiada henti mengiringi setiap langkah penulis. Segala pengorbanan, nasihat, dan semangat yang diberikan menjadi motivasi terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Semoga Allah SWT membalas setiap kebaikan dengan pahala yang berlipat.

7. Luthfia Wira Nabila selaku partner serta memberikan semangat kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir.
8. Yafi Dzakia Muttaqin selaku partner laboratorium penulis yang telah banyak membantu.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL		i
HALAMAN PENGESAHAN		ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI		iv
DEDIKASI		v
KATA PENGANTAR		vi
DAFTAR ISI		viii
DAFTAR TABEL		xi
DAFTAR GAMBAR		xiii
DAFTAR LAMPIRAN		xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN		xvii
ABSTRAK		xix
ABSTRACT		xx
BAB I	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	3
1.3	Tujuan Penelitian	3
1.4	Manfaat Penelitian	4
1.5	Batasan Penelitian	4
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1	Penelitian tentang Pemanfaatan *Styrofoam*	6
2.2	Penelitian tentang *Superpave*	7
2.3	Perbandingan Penelitian	9
BAB III	LANDASAN TEORI	15
3.1	Perkerasan Jalan	15
3.2	Jenis Perkerasan Jalan	15
3.3	Perkerasan Lentur	16
3.4	Bahan Penyusun Perkerasan	17
3.4.1	Agregat	17
3.4.2	Aspal	19
3.5	Campuran *Superpave*	20

3.5.1 Spesifikasi *Marshall Superpave* 20
3.5.2 Gradasi Agregat *Superpave* 21
3.6 Limbah *Styrofoam* Sebagai Penambahan Aspal 22
3.6.1 Aspal 22
3.6.2 *Styrofoam* 22
3.7 Metode Perhitungan Kadar Aspal pada Campuran *Superpave* 23
3.8 Karakteristik Pengujian *Marshall Standard*(*MS*) 24
3.8.1 Stabilitas (*Stability*) 24
3.8.2 Kelelehan (*Flow*) 24
3.8.3 *Void In Total Mix* (*VITM*) 25
3.8.4 *Marshall Quotient* (*MQ*) 25
3.8.5 *Void In Material Agregate* (*VMA*) 26
3.8.6 *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*) 26
3.8.7 Densitas (*density*) 27
3.9 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*) 27
3.10 Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*) 28
3.11 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*) 28
BAB IV METODE PENELITIAN 30
4.1 Tinjauan Umum 30
4.2 Metode Pengambilan Sample 30
4.3 Metode Pengambilan Data 30
4.4 Tahapan Penelitian 31
4.4.1 Persiapan dan pemeriksaan Bahan Sampel 31
4.4.2 Persiapan Alat 33
4.4.3 Perencanaan Campuran Benda Uji 34
4.5 Analisa Data 43
4.6 *Flow Chart* Penelitian 45
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 47
5.1 Hasil Penelitian 47
5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 47
5.1.2 Hasil Pengujian Agregat 50
5.1.3 Hasil Pengujian untuk Menentukan Kadar Aspal

Optimum (KAO) pada campuran *Superpave* 51
5.1.4 Hasil Pengujian untuk campuran *Superpave* Dengan Penambahan *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 52
5.2 Pembahasan 54
5.2.1 Karakteristik Aspal 54
5.2.2 Karakteristik Agregat Kasar 66
5.2.3 Penentuan KAO Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 67
5.2.4 Karakteristik *Marshall* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 74
5.2.5 Karakteristik *IRS* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 87
5.2.6 Karakteristik *ITS* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 89
5.2.7 Karakteristik *TSR* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 91
5.2.8 Rekapitulasi Perbandingan Hasil Pengujian Karakteristik Keseluruhan Penambahan Kadar *Styrofoam* 93
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 105
6.1 Kesimpulan 105
6.2 Saran 105
DAFTAR PUSTAKA 108
LAMPIRAN 112

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu 11
Tabel 3.1 Persyaratan Pemeriksaan Agregat Kasar 18
Tabel 3.2 Persyaratan Pemeriksaan Agregat Halus 19
Tabel 3.3 Persyaratan Aspal Penetrasi 60/70 20
Tabel 3.4 Spesifikasi *Superpave* 20
Tabel 3.5 Spesifikasi *Superpave* untuk maksimal agregat nominal 12,5 mm 21
Tabel 4.1 Gradasi *Superpave* Campuran Agregat Ukuran Maksimal Nominal 12,5 mm 35
Tabel 4.2 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 4,5% 37
Tabel 4.3 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 5% 37
Tabel 4.4 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 5,5% 37
Tabel 4.5 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 6% 38
Tabel 4.6 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 6,5% 38
Tabel 4.7 Kebutuhan Benda Uji untuk Mengetahui KAO 39
Tabel 4.8 Rincian Kebutuhan Benda Uji pada Setiap Pengujian Berdasar Kadar *Styrofoam* Terhadap Aspal 39
Tabel 5.1 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 47
Tabel 5.2 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 2 % 48
Tabel 5.3 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 4 % 48
Tabel 5.4 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 6 % 49
Tabel 5.5 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 8 % 50
Tabel 5.6 Data Pengujian Agregat Kasar 50
Tabel 5.7 Data Pengujian Agregat Halus 51
Tabel 5.8 Data Pengujian Berat Jenis *Filler* 51

Tabel 5.9 Data Hasil Pengujian Kadar Aspal Optimum (KAO) 51
Tabel 5.10 Penentuan Berat Penambahan *Styrofoam* 52
Tabel 5.11 Data Hasil Pengujian *Marshall Standard*(*MS*) Sesuai Kadar *Styrofoam* 53
Tabel 5.12 Data Hasil Pengujian *IRS* Sesuai Kadar *Styrofoam* 53
Tabel 5.13 Data Hasil Pengujian *ITS* Sesuai Kadar *Styrofoam* 54
Tabel 5.14 Data Hasil Pengujian *TSR* Sesuai Kadar *Styrofoam* 54
Tabel 5.15 Pengaruh Berbagai Kadar Limbah *Styrofoam* Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Aspal Pen 60/70 93
Tabel 5.16 Pengaruh Berbagai Kadar Limbah *Styrofoam* Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik *Marshall Standard* (*MS*) pada Campuran Aspal Pen 60/70 *Superpave* 94
Tabel 5.17 Pengaruh Berbagai Kadar Limbah *Styrofoam* Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik *IRS, ITS* dan *TSR* pada Campuran Aspal Pen 60/70 *Superpave* 95
Tabel 5.18 Perbandingan Nilai Propertis Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada *Superpave* Dengan Aspal Pen 60/70 96
Tabel 5.19 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Volumetrik 98
Tabel 5.20 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Kekuatan 100
Tabel 5.21 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Durabilitas 101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Lapisan Perkerasan Lentur 16
Gambar 4.1 Gradasi Agregat *Superpave* Rencana 35
Gambar 4.2 *Flow Chart* Pengujian 45
Gambar 5.1 Grafik Penentuan Kadar Aspal Optimum pada Campuran *Superpave* 52
Gambar 5.2 Grafik Nilai Penetrasi Aspal 55
Gambar 5.3 Grafik Nilai Daktilitas Aspal 57
Gambar 5.4 Grafik Nilai Berat Jenis Aspal 59
Gambar 5.5 Grafik Nilai Titik Nyala Aspal 61
Gambar 5.6 Grafik Nilai Titik Bakar Aspal 62
Gambar 5.7 Grafik Nilai Titik Lembek Aspal 63
Gambar 5.8 Grafik *Penetration Index* (PI) 65
Gambar 5.8 Grafik Nilai Stabilitas KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 68
Gambar 5.9 Grafik Nilai *Flow* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 69
Gambar 5.10 Grafik Nilai *VITM* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 70
Gambar 5.11 Grafik Nilai *VMA* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 71
Gambar 5.12 Grafik Nilai *VFWA* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 72
Gambar 5.13 Grafik Nilai Densitas KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 72
Gambar 5.14 Grafik Nilai *MQ* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70 73
Gambar 5.15 Grafik Stabilitas Aspal 74
Gambar 5.16 Grafik *Flow* Aspal 76
Gambar 5.17 Grafik *VITM* Aspal *Styrofoam* 78
Gambar 5.18 Grafik *VMA* Aspal *Styrofoam* 79
Gambar 5.19 Grafik *VFWA* Aspal *Styrofoam* 81
Gambar 5.20 Grafik Densitas Aspal *Styrofoam* 84
Gambar 5.21 Grafik *MQ* Aspal *Styrofoam* 86
Gambar 5.22 Grafik *IRS* Aspal *Styrofoam* 88
Gambar 5.23 Grafik *ITS* Aspal *Styrofoam* 90

Gambar 5.24 Grafik *TSR* Aspal *Styrofoam* 91

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0% 113
Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2% 114
Lampiran 3 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4% 115
Lampiran 4 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6% 116
Lampiran 5 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8% 117
Lampiran 6 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0% 118
Lampiran 7 ..Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2% 119
Lampiran 8 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4% 120
Lampiran 9 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6% 121
Lampiran 10 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8% 122
Lampiran 11 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0% 123
Lampiran 12 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2% 124
Lampiran 13 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4% 125
Lampiran 14 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6% 126
Lampiran 15 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8% 127
Lampiran 16 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0% 128
Lampiran 17 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2% 129
Lampiran 18 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4% 130
Lampiran 19 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6% 131
Lampiran 20 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8% 132
Lampiran 21 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0% 133
Lampiran 22 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2% 134
Lampiran 23 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4% 135

Lampiran 24 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6% 136
Lampiran 25 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8% 137
Lampiran 26 Pemeriksaan Kelarutan TCE Aspal Pen 60/70 Murni 138
Lampiran 27 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar 139
Lampiran 28 Pemeriksaan Keausan Agregat Kasar 140
Lampiran 33 Pemeriksaan *Marshall Standard*Gradasi *Superpave* Pen 60/70 KAO 145
Lampiran 34 Grafik Hasil Pemeriksaan *Marshall Standard* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 KAO 146
Lampiran 35 Pemeriksaan *Marshall Standard* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 147
Lampiran 36 Grafik Hasil Pemeriksaan *Marshall Standard* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 148
Lampiran 37 Pemeriksaan ITS Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 149
Lampiran 38 Pemeriksaan IRS Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 150
Lampiran 39 Grafik Hasil Pemeriksaan IRS Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 151
Lampiran 40 Pemeriksaan TSR Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 150
Lampiran 41 Grafik Hasil Pemeriksaan TSR Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam* 151

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

AC = *Asphalt Concrete*

AASHTO = *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

BBR = *Bending Beam Rheometer*

BC = *Binder Course*

CA = *Coarse Aggregate* (Agregat Kasar)

DSR = *Dynamic Shear Rheometer*

EPS = *Expanded Polystyrene* (*Styrofoam*)

FAA = *Fine Aggregate Angularity*

FA = *Fine Aggregate* (Agregat Halus)

HMA = *Hot Mix Asphalt*

ITS = *Indirect Tensile Strength*

IRS = *Index of Retained Strength*

KAO = Kadar Aspal Optimum

LA = *Los Angeles Abrasion*

MQ = *Marshall Quotient*

MWD = *Marble Waste Dust*

OGFC = *Open-Graded Friction Course*

PAV = *Pressure Aging Vessel*

RTFO = *Rolling Thin Film Oven*

SHRP = *Strategic Highway Research Program*

TPS = Tempat Pembuangan Sampah

TSR = Tensile Strength Ratio

VFWA = *Void Filled with Asphalt*

VITM = *Void in Total Mix*

VMA = *Void in Mineral Aggregate*

WC	= *Wearing Course*
Pb	= Perkiraan kebutuhan kadar aspal dalam campuran (%)
CA (%)	= Persentase agregat kasar dalam campuran (%)
FA (%)	= Persentase agregat halus dalam campuran (%)
Filler	= Bahan pengisi yang lolos saringan No. 200
n	= Nilai *Void In Total Mix* (*VITM*)
g	= Berat isi campuran (gr/cc)
h	= Berat jenis maksimum teoritis campuran (gr/cc)
Q	= Nilai stabilitas *Marshall* (kg)
p	= Pembacaan dial stabilitas × kalibrasi proving ring
q	= Nilai koreksi benda uji
S	= Stabilitas *Marshall* (kg)
F (mm)	= *Flow* (mm)
MQ	= *Marshall* Quotient
Gmb	= Berat jenis bulk benda uji
Gbs	= Berat jenis bulk agregat
Density	= Densitas campuran (gr/cc)
°C	= Derajat Celcius
mm	= Milimeter
gr/cc	= Gram per centimeter kubik
PI	= *Penetration Index*
Pen 60/70	= Jenis aspal penetrasi 60/70

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan infrastruktur menuntut material perkerasan yang kuat, tahan deformasi, dan berkelanjutan. Di sisi lain, limbah *Styrofoam* berbasis *polystyrene* yang sulit terurai menimbulkan permasalahan lingkungan, namun memiliki potensi sebagai bahan tambah aspal karena sifat termoplastiknya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan limbah *Styrofoam* terhadap karakteristik volumetrik, kekuatan, dan durabilitas campuran *Superpave* menggunakan aspal Pen 60/70.

Penelitian dilakukan dengan desain campuran *Superpave* dan metode pencampuran basah (*wet mixing*). *Styrofoam* dicampurkan ke dalam aspal panas pada suhu 150 °C selama 30 menit dengan variasi kadar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat aspal. Parameter yang dianalisis meliputi VITM, VMA, VFWA, dan densitas untuk karakteristik volumetrik; stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), dan Indirect Tensile Strength (ITS) untuk kekuatan; serta Index Retained Strength (IRS) dan Tensile Strength Ratio (TSR) untuk durabilitas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar *Styrofoam* 6% memberikan kinerja paling optimal. Nilai VITM menurun dari 4,60% menjadi 3,59%, VMA dari 15,90% menjadi 15,10%, dan VFWA meningkat dari 73,67% menjadi 78,43%. Nilai stabilitas Marshall mencapai 1.715,98 kg, nilai ITS sebesar 785,63 kPa, serta nilai IRS dan TSR masing-masing mencapai 97,90% dan 88,80%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* 6% mampu meningkatkan kinerja campuran *Superpave* secara volumetrik, struktural, dan durabilitas, sekaligus mendukung pemanfaatan limbah *Styrofoam* secara berkelanjutan.

Kata Kunci: *Expanded Polystyrene (EPS)*; Limbah *Styrofoam;*Aspal Polimer*;* Metode Pencampuran Basah*;* Gradasi *Superpave;* Aspal *Pen 60/70.*

ABSTRACT

The increasing demand for infrastructure development requires pavement materials that are strong, deformation-resistant, and sustainable. Meanwhile, Styrofoam waste based on polystyrene, which is difficult to degrade, poses serious environmental concerns but also exhibits potential as an asphalt additive due to its thermoplastic properties. This study aims to analyze the effect of incorporating Styrofoam waste on the volumetric characteristics, strength, and durability of Superpave mixtures using Pen 60/70 asphalt.

The study employed the Superpave mix design method with a wet-mixing approach. Styrofoam was blended into hot asphalt at a temperature of 150 °C for 30 minutes with additive contents of 0%, 2%, 4%, 6%, and 8% by weight of asphalt. The evaluated parameters included VITM, VMA, VFWA, and density for volumetric characteristics; stability, flow, Marshall Quotient (MQ), and Indirect Tensile Strength (ITS) for mixture strength; as well as Index Retained Strength (IRS) and Tensile Strength Ratio (TSR) for durability performance.

The results indicate that a Styrofoam content of 6% provides the most optimal overall performance. The VITM value decreased from 4,60% to 3,59%, VMA from 15,90% to 15,10%, while VFWA increased from 73,67% to 78,43%. The Marshall stability reached 1.715,98 kg, the ITS value was 785,63 kPa, and the IRS and TSR values reached 97,90% and 88,80%, respectively. These findings demonstrate that the incorporation of 6% Styrofoam effectively enhances the volumetric properties, structural performance, and durability of Superpave mixtures, while simultaneously supporting sustainable utilization of Styrofoam waste.

Keyword**:** *Expanded Polystyrene (EPS); Styrofoam Waste; Polymer-Modified Asphalt;Wet Mixing Method; Superpave Mix Design; Pen 60/70 Asphalt Binder.*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Plastik merupakan material yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, sehingga volumenya terus meningkat setiap tahun. Kenaikan ini memicu akumulasi limbah yang berdampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan. Menurut Macleod dkk. (2021), mikroplastik dapat masuk ke rantai makanan dan menumpuk dalam jaringan tubuh, berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan. Dari sisi ekologi, pencemaran plastik di darat maupun perairan mengganggu keseimbangan ekosistem karena sifatnya yang sulit terurai.

Salah satu limbah plastik yang banyak dihasilkan adalah *Styrofoam* (*polystyrene*). Triyono dkk. (2023) menegaskan bahwa *Styrofoam* merupakan plastik berbasis *polysterene* yang termasuk kategori plastik sintetis. Penggunaannya sebagai kemasan dan pelindung barang menyebabkan volume limbahnya meningkat tajam. LIPI (2018) mencatat bahwa 0,27–0,59 juta ton limbah plastik terutama oleh *Styrofoam*, yang mencemari perairan Indonesia setiap tahun. Setiawan dkk. (2022) juga menyatakan bahwa *Styrofoam* membutuhkan waktu ratusan tahun untuk terurai, sehingga menjadi ancaman jangka panjang bagi lingkungan. Secara global, polystyrene menyumbang sekitar 10% limbah plastik dengan tingkat daur ulang yang sangat rendah (Crespo dkk., 2022). Metode penanganan konvensional seperti pembakaran dan penimbunan limbah *Styrofoam* tidak hanya berdampak buruk pada lingkungan, tetapi juga memerlukan energi dalam jumlah besar.

Disisi lain, pada saat ini dengan semakin padatnya aktivitas masyarakat meningkatkan jumlah kendaraan bermotor terus bertambah dari tahunnya. Menurut Fachrudin dkk. (2025), Peningkatan ini mendorong kenaikan volume dan beban lalu lintas pada jalan yang memberikan beban yang besar terhadap perkerasan jalan,

sehingga menjadi lebih mudah rusak. Dengan demikian, dibutuhkan Infrastruktur jalan yang dapat memegang peran strategis dalam sistem transportasi dan perkembangan ekonomi, sehingga memerlukan material perkerasan yang mampu bertahan terhadap perubahan cuaca dan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi (Hussain dkk., 2019).

Seiring meningkatnya kebutuhan lalu lintas, campuran aspal dituntut memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan beban berulang. Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mencapai hal tersebut adalah gradasi *Superpave*, yang dikembangkan agar campuran lebih stabil terhadap perubahan cuaca dan tekanan kendaraan. Susunan agregat pada sistem ini menjadi faktor yang sangat menentukan karena berpengaruh langsung pada kestabilan, ketahanan terhadap deformasi, dan potensi keretakan perkerasan (Ji dkk., 2023). Di samping itu, pengembangan material perkerasan saat ini juga diarahkan pada pemanfaatan bahan yang lebih ramah lingkungan, termasuk limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambahan. Dalam penelitian ini, aspal penetrasi 60/70—yang umum dipakai pada konstruksi jalan di Indonesia—dipadukan dengan limbah *Styrofoam* untuk meningkatkan kualitas campuran tanpa mengubah jumlah aspal dasarnya. Penambahan *Styrofoam* dilakukan pada kadar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% untuk menilai pengaruhnya terhadap sifat volumetrik, kekuatan, dan ketahanan campuran terhadap kerusakan.

Untuk mengetahui Pengaruh tersebut, dapat diketahui melalui pengujian metode *Marshall* yang mencakup penilaian parameter volumetrik seperti *Void In Total Mix* (*VITM*), *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*), *Void in Mineral Aggregate* (*VMA*), dan densitas. Selain itu, metode *Marshall* juga digunakan untuk menilai parameter kekuatan seperti stabilitas, *Flow*, *Marshall Quotient* (*MQ*), dan kekuatan tarik tidak langsung atau *Indirect Tensile Strength* (*ITS*). Durabilitas dievaluasi menggunakan pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*) dan *Tensile Strength Ratio* (*TSR*).

Penelitian ini memfokuskan penilaian durabilitas pada *IRS* dan *TSR* karena kedua parameter tersebut menggambarkan kemampuan campuran dalam mempertahankan kekuatan setelah terpapar air, yang merupakan bentuk kerusakan paling umum pada campuran aspal bergradasi rapat. Sementara itu, pengujian

Cantabro Loss (CL) tidak digunakan karena prosedur tersebut diperuntukkan bagi campuran berpori untuk menilai ketahanan abrasi dan pelepasan butiran, sedangkan campuran dalam penelitian ini memiliki struktur padat. Oleh karena itu, *IRS* dan *TSR* dianggap lebih relevan secara teknis dalam menggambarkan durabilitas campuran yang diteliti.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan alternatif pemanfaatan limbah *Styrofoam* yang lebih berkelanjutan sekaligus meningkatkan performa campuran *Superpave*, sehingga dapat mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang ada pada latar belakang,di dapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah aspal pen 60/70 terhadap parameter volumetrik campuran Aspal *Superpave* ?
2. Bagaimana pengaruh limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah aspal pen 60/70 terhadap kekuatan struktur campuran Aspal *Superpave*?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah aspal pen 60/70 terhadap durabilitas campuran Aspal *Superpave*?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan limbah *Styrofoam* terhadap campuran aspal. Tujuan spesifik penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah aspal pen 60/70 terhadap parameter volumetrik gradasi *Superpave*
2. Mengetahui pengaruh limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah aspal pen 60/70 terhadap kekuatan struktur campuran gradasi *Superpave*
3. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah aspal pen 60/70 terhadap durabilitas campuran gradasi *Superpave*

1.4 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini diharapkan manfaat yang akan diperoleh sebagai berikut:

1. Menjadi salah satu cara untuk pengelolaan dan pemanfaatan limbah polimer *polystyrene* (PS) menjadi bahan yang kembali berguna dan tidak mencemari lingkungan.
2. Sebagai upaya untuk meningkatkan daya dukung dan kekuatan aspal agar lebih baik dalam menerima beban lalu lintas dan memiliki durabilitas yang lebih baik.

1.5 Batasan Penelitian

Pada penelitian ini, memerlukan adanya batasan agar memperjelas arah dalam penelitian yang akan dilakukan, sebagai berikut:

1. Spesifikasi dan peraturan yang digunakan berasal dari Bina Marga 2018 revisi 2 dan Strategic Highway Research Program (SHRP) 1994
2. Gradasi agregat yang digunakan gradasi *Superpave*.
3. Campuran *Superpave* dengan ukuran maksimum nominal 12,5 mm
4. Agregat kasar halus dan *filler* yang digunakan berasal dari Laboratorium Jalan Raya,Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia .
5. Jenis aspal yang digunakan yaitu aspal Pertamina Penetrasi 60/70.
6. Kadar aspal yang digunakan yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%
7. Metode Pengujian dan perencanaan campuran yang digunakan yaitu berdasarkan *Marshall Standard*(*MS*)
8. Pengujian sampel dilakukan pada Laboratorium Jalan Raya,Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
9. Bahan penambahan aspal yang digunakan adalah limbah *Styrofoam*
10. Limbah *Styrofoam* didapatkan dari tempat pembuangan sampah (TPS) di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta
11. Kadar penggunaan penambahan *Styrofoam* terhadap aspal yaitu dalam bentuk persen (%)
12. Tidak memperhitungkan reaksi kimia yang terjadi dan tidak menganalisis

secara kimiawi .

13. *Styrofoam* diolah dengan cara dihancurkan menjadi potongan kecil,
14. Pengujian dilakukan dengan kadar limbah *Styrofoam* 0%,2%,4%,6%, dan 8% dari total berat aspal
15. Pengujian yang dilakukan mengetahui karakteristik volumetrik campuran yaitu melalui pengukuran *VITM*, *VFWA*, Densitas dan *VMA*
16. Pengujian kekuatan struktur aspal diperoleh melalui *MQ*, *Flow*, stabilitas campuran, dan *ITS*
17. Pengujian durabilitas aspal menggunakan *IRS* dan *TSR*

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian tentang Pemanfaatan *Styrofoam*

Tandiabang dkk. (2022) meneliti pemanfaatan batu Sungai Tetean sebagai agregat dan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah pada campuran AC-WC. Tujuan utamanya adalah memaksimalkan potensi material lokal serta mengurangi dampak lingkungan akibat limbah *Styrofoam*. Penambahan *Styrofoam* dilakukan dalam beberapa variasi kadar, yaitu 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat aspal. Pengujian dilakukan menggunakan metode Marshall konvensional dan *Marshall Immersion* untuk mengetahui karakteristik campuran, meliputi stabilitas, *flow*, *VITM*, *VMA*, dan *VFWA*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh parameter memenuhi standar Bina Marga 2018 Revisi 2. Penambahan *Styrofoam* terbukti dapat memperkuat ikatan agregat, meningkatkan kekedapan air, dan menambah ketahanan campuran terhadap beban. Kadar optimal untuk performa keseluruhan adalah 6%, sedangkan ketahanan air terbaik diperoleh pada kadar 8%.

Nasot dkk. (2024) menganalisis pengaruh penambahan limbah *Polyesterene* sebagai bahan aditif dalam campuran beton aspal jenis AC-WC, dengan fokus pada perubahan karakteristik Marshall seperti stabilitas, kelelehan (*flow*), *VMA*, *VITM*, *VFWA*, dan *MQ*. Pengujian dilakukan di laboratorium dengan variasi kadar polistirena sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20%. Selain itu, uji Marshall dilakukan setelah waktu perendaman 30 menit dan 24 jam sesuai Standar Bina Marga 2018 Revisi 2.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *Polystyrene* sebesar 5% dapat meningkatkan stabilitas campuran. Namun, ketika kadar polistirena melebihi 10%, stabilitas mulai menurun akibat meningkatnya rongga dalam campuran. Pada kadar 15% dan 20%, nilai *flow* melebihi batas spesifikasi, yang mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih lunak dan rentan mengalami deformasi plastis. Seiring meningkatnya kadar polistirena, nilai *VMA* dan *VITM* juga meningkat,

menunjukkan adanya porositas yang lebih besar dalam campuran. Kondisi ini dapat berdampak negatif terhadap ketahanan campuran terhadap air maupun beban lalu lintas. Selain itu, nilai *VFWA* mengalami penurunan pada kadar polistirena di atas 10%, yang menunjukkan berkurangnya efektivitas aspal dalam mengisi rongga campuran.

Berdasarkan hasil penelitian, kadar polistirena sebesar 5% dianggap optimal karena mampu meningkatkan stabilitas sambil tetap memenuhi persyaratan mekanis. Namun, kadar yang lebih tinggi cenderung menurunkan daya tahan campuran. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk memahami mekanisme pembentukan rongga, menguji ketahanan jangka panjang, serta mengevaluasi aspek lingkungan dan ekonomi guna mendukung penerapan yang lebih luas dan berkelanjutan.

2.2 Penelitian tentang *Superpave*

Obaidat dkk. (2019), Penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja campuran aspal menggunakan metode desain *Superpave* dengan menambahkan limbah *Styrofoam* (polistirena) sebagai bahan modifikasi. *Styrofoam* tersebut dipersiapkan dengan cara dicuci menggunakan air hangat, dikeringkan pada suhu ruang sekitar 23°C, lalu dihancurkan menjadi ukuran maksimal 10 mm. Bahan pengikat yang digunakan adalah aspal dengan penetrasi 60/70. Berbagai pengujian dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat aspal akibat penambahan polistirena, antara lain uji penetrasi, daktilitas, berat jenis, titik nyala, serta uji lanjutan seperti DSR, RTFO, PAV, dan BBR sesuai standar *ASTM* 2008.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin banyak polistirena yang ditambahkan ke dalam campuran, nilai penetrasi aspal meningkat, tetapi ketahanannya terhadap deformasi permanen justru menurun. Selain itu, nilai daktilitas berkurang, yang berarti aspal menjadi lebih rapuh dan mudah retak. Titik lembek juga menurun, sehingga aspal menjadi kurang stabil terhadap suhu tinggi. Berat jenis aspal ikut menurun karena karakteristik polistirena yang ringan, sementara nilai titik nyala dan titik bakar meningkat, yang mengindikasikan bahwa aspal campuran ini lebih aman terhadap risiko kebakaran.

Secara keseluruhan, campuran aspal yang dimodifikasi dengan polistirena

cenderung tidak cocok digunakan di jalan raya yang menahan beban berat karena terjadi penurunan pada parameter rutting dan kelelahan. Namun, material ini justru memiliki ketahanan retak yang baik pada suhu rendah. Oleh karena itu, penggunaan aspal termodifikasi polistirena lebih disarankan untuk area dengan suhu dingin dan beban lalu lintas rendah, seperti trotoar, lahan parkir, serta bagian isolasi bangunan.

Berdasarkan Mulatu dkk. (2020), melakukan penelitian mengenai Evaluasi kinerja *Hot Mix Agregat* (HMA) menggunakan efek gabungan dari pengisi debu limbah marmer dan gradasi agregat *Superpave*. Dalam pengujian ini campuran aspal yang digunakan yaitu bergradasi *Superpave* dan menggunakan aspal penetrasi 60/70. Dan untuk *filler* yang digunakan yaitu berbahan debu limbah keramik (*marble*).

Terdapat beberapa pengujian yaitu pengujian volumetrik seperti *VITM*, *VMA*, *VFWA* dan stabilitas serta *Flow* dengan metode *MS*. Dengan kadar aspal mulai dari 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6 %. Dalam penelitian ini, debu limbah marmer digunakan sebagai *filler* pengganti dalam campuran aspal panas (HMA). Kadar *filler* limbah debu keramik atau *Marble Wasting Dust* (MWD) yang diuji berkisar antara 1% hingga 5% dari total *filler* dalam campuran.

Hasil yang didapat yaitu stabilitas *Marshall* meningkat seiring dengan bertambahnya kandungan *filler* limbah debu keramik atau *Marble Wasting Dust* (MWD) hingga 3%, kemudian mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi.kemudian densitas campuran dengan MWD berkisar antara 2,308 - 2,314 g/cm³, untuk nilai tertinggi pada kadar 3% dan 4,5%. *Marshall Flow* tetap dalam rentang spesifikasi (2-4 mm), dengan nilai minimum 2,43 mm pada kadar 3% MWD. Dalam Kadar rongga udara berkurang seiring bertambahnya *filler* MWD, tetapi tetap dalam batas spesifikasi (3-5%). *VMA* sedikit menurun dengan penambahan *filler* MWD, dengan nilai terendah 14,3% pada kadar 3%. Yang terakhir yaitu oid Filled *VFWA* meningkat seiring bertambahnya *filler* MWD, dengan nilai tertinggi 74,5% pada kadar 3%.

Penelitian yang dilakukan oleh Hadi dkk. (2025) bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh zona larangan yang terdapat di bagian tengah gradasi agregat *Superpave* terhadap kinerja campuran aspal dilihat dari uji

karakteristik *Marshall*. Zona larangan sendiri merupakan area gradasi yang sering diperdebatkan karena diduga bisa menurunkan kualitas perkerasan. Dalam penelitian ini digunakan tiga variasi gradasi, yaitu gradasi batas atas, tengah (zona larangan), dan batas bawah. Bahan yang digunakan berupa agregat dari wilayah Clereng, Kulon Progo, serta aspal jenis penetrasi 60/70. Proses pengujian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya UII menggunakan metode *Marshall* untuk mengukur stabilitas, kelelehan, dan densitas.

Dari hasil pengujian, campuran dengan gradasi batas atas menghasilkan nilai stabilitas, kelelehan, dan densitas paling tinggi, sehingga dianggap paling cocok untuk kondisi lalu lintas berat. Namun, gradasi tengah yang selama ini dianggap sebagai zona bermasalah ternyata masih menunjukkan hasil yang baik dan bahkan lebih unggul dari gradasi bawah. Secara angka, gradasi tengah memiliki stabilitas 10,66% lebih tinggi dari gradasi bawah, kelelehan lebih tinggi 3,03%, dan densitas lebih besar 7,25%. Dibandingkan gradasi atas, selisihnya juga tidak terlalu jauh.

Kesimpulannya, penggunaan gradasi tengah yang selama ini dianggap zona larangan ternyata masih bisa dipertimbangkan dalam desain campuran aspal. Hasil ini menunjukkan bahwa gradasi tengah dapat menjadi alternatif jika penggunaan gradasi atas tidak memungkinkan di lapangan. Penelitian ini bermanfaat untuk menambah referensi dalam desain gradasi *Superpave* yang lebih fleksibel dan sesuai dengan kondisi lokal di Indonesia.

2.3 Perbandingan Penelitian

Dalam penelitian ini penulis menggunakan *Styrofoam* sebagai bahan penambahan dalam cairan aspal pen 60/70 campuran aspal *Superpave*. Menurut Nurherdiana dkk. (2023). Menyebutkan *Styrofoam* merupakan polimer matriks atau *Polystyrene* yaitu bahan yang memiliki sifat plastik dan digunakan oleh masyarakat sebagai kemasan makanan sehari-hari.

Styrofoam memiliki sifat fisik yang mirip dengan aspal, yaitu berbentuk padat pada suhu ruang, mencair ketika dipanaskan di atas 100°C, dan kembali mengeras saat didinginkan. Pemanfaatan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambahan dalam campuran perkerasan aspal mampu meningkatkan daya dukung terhadap beban lalu

lintas, mengurangi deformasi plastis, serta memperkuat ketahanan terhadap deformasi permanen *rutting* dan retak. Selain itu, campuran ini juga cenderung lebih tahan terhadap kelelahan material (*Flow*), meminimalisir terlepasnya butiran agregat, dan menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh cuaca. (Tandiabang dkk, 2022). menyebutkan bahwa *Styrofoam* memiliki sifat yang hampir sama dengan aspal dan dapat meningkatkan kemampuan perkerasan.

Perbedaan dengan penelitian yang dilakukan oleh Obaidat dkk. (2019) yaitu tentang *Characterization Of Asphalt Binder Modified With Polystyrene Using Superpave Specification* yaitu pada pengujian yaitu pengujian penetrasi, daktilitas, spesific gravity dan pengujian titik nyala aspal, Dynamic Shear Rheometer (DSR), *Rolling Thin Film Oven* (RTFO), *Pressure Aging Vessel* (PAV), dan *Bending Beam Rheometer (*BBR*)*. Dalam pengujian ini standar yang diterapkan yaitu sesuai dengan *ASTM* 2008. Sedangkan penulis melakukan penelitian dengan melakukan metode *MS* untuk melakukan pengujian volumetrik seperti *VITM*, *VFWA*, *density* dan *VMA*. Selain itu, metode *Marshall* digunakan untuk mengetahui *MQ*, stabilitas campuran aspal, dan *ITS* yaitu untuk mengetahui karakteristik kekuatan aspal. Untuk durabilitas penulis menggunakan pengujian *IRS* dan *TSR*. Selain pengujian, perbedaan antara penulis dan Obaidat dkk. (2019) yaitu adanya perbedaan variable yang diuji. Penulis melakukan pengujian campuran aspal sedangkan Obaidat dkk. (2019) melakukan pengujian pada cairan Aspal saja.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh penulis pada tahun 2025, penulis akan melakukan penelitian terhadap karakteristik aspal campuran panas melalui metode *MS*. Metode ini dipilih karena dapat menghasilkan parameter yang dapat digunakan untuk menilai stabilitas dan kadar optimal aspal. Metode tersebut dapat menilai pengaruh limbah *Styrofoam* terhadap stabilitas dan nilai-nilai parameter lainnya yang dapat menentukan karakteristik campuran aspal, sehingga penelitian terhadap pengaruh limbah *Styrofoam* dengan campuran aspal *Superpave* ini dapat dilakukan dengan akurat.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Obaidat,dkk (2019)	Mulatu,dkk (2020)	Tandiabang,dkk (2022)	Nasot,dkk (2024)	Hadi, dkk (2025)	Ahnaf (2025)
1	Judul	Characterization Of Asphalt Binder Modified With *Polystyrene* Using *Superpave* Specification	Evaluation of the HMA performance using combined effects of marble waste dust *filler* and *Superpave* aggregate gradation	Pengaruh *Styrofoam* Sebagai Bahan Tambah Campuran AC-WC Batu Sungai Tetean Kabupaten Mamasa Samudra	Pengaruh Penambahan *Styrofoam* Terhadap Karakteristik *Marshall* Pada Lapisan Aspal Beton Ac-Wc	Investigasi Pengaruh Zona Larangan Pada Gradasi *Superpave* Terhadap Standar *Marshall*	Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah *Styrofoam* Untuk Bahan Tambah Aspal Pen 60/70 Pada Campuran *Superpave*
2	Jenis Campuran	*Superpave*	*Superpave*	AC-WC	AC-WC	*Superpave*	*Superpave*

Sumber:Obaidat,dkk (2019), Mulatu,dkk (2020), Rosyad,dkk (2022), Nasot,dkk (2024), Hadi,dkk (2025), Ahnaf (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Obaidat, dkk (2019)	Mulatu,dkk (2020)	Tandiabang,dkk (2022)	Nasot,dkk (2024)	Hadi,dkk (2025)	Ahnaf (2025)
3	Jenis aspal	Aspal penetrasi 60/70	Aspal penetrasi 60/70	Aspal penetrasi 60/70	Aspal Penetrasi 60/70	Aspal Penetrasi 60/70	Aspal Penetrasi 60/70
4	Modifikasi	Penambahan *Styrofoam* pada aspal	*Filler* MWD	Penambahan Limbah *Styrofoam* pada aspal	*Penambahan Styrofoam* dan *Filler* semen	penggunaan gradasi agregat di zona larangan	Penambahan Limbah *Styrofoam*
5	Hasil penelitian	-Penambahan polistirena meningkatkan nilai penetrasi aspal, tetapi mengurangi ketahanan terhadap deformasi permanen. -Nilai daya regang menurun dengan peningkatan kadar polistirena. -Modifikasi aspal dengan polistirena menurunkan titik lembek dan gravitasi spesifiknya. -Nilai titik nyala dan titik bakar meningkat,	- Campuran HMA dengan *filler* MWD memenuhi spesifikasi nasional dan internasional. -Kadar optimal *filler* MWD adalah 3%, karena menghasilkan stabilitas tertinggi dan parameter *Marshall* terbaik. -Penggunaan debu marmer sebagai *filler* alternatif dapat menjadi solusi dalam mengurangi limbah industri dan meningkatkan kinerja perkerasan aspal. - Studi ini membuktikan bahwa *Superpave* aggregate	-Stabilitas campuran meningkat seiring naiknya kadar *Styrofoam*, tertinggi pada 6% sebesar 1715,98 kg, lalu turun pada 8%. -*VITM* turun dari 4,87% menjadi 3,25%, menandakan campuran makin padat dan lebih tahan air. -*Flow* menurun sampai kadar 4%, lalu naik kembali pada 6–8%, namun masih dalam batas standar. - Nilai *VMA* dan *VFWA* cenderung naik,	-Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 5% *Styrofoam* meningkatkan stabilitas campuran, -kadar di atas 10% menyebabkan penurunan stabilitas akibat meningkatnya rongga dalam campuran. -Pada kadar 15% dan 20%, nilai *Flow* melebihi batas spesifikasi, menandakan campuran lebih lunak dan rentan terhadap deformasi	-Penelitian ini mengkaji pengaruh zona larangan pada gradasi agregat *Superpave* terhadap kualitas campuran aspal, fokus pada stabilitas, kelelehan, dan densitas dengan metode *Marshall*. -Bahan terdiri dari agregat Clereng dan aspal Pen 60/70, diuji pada gradasi atas, tengah, dan bawah dengan kadar aspal masing-masing 6,3%, 5,9%, dan 5,3%.	– Stabilitas meningkat seiring penambahan *Styrofoam* dan mencapai nilai tertinggi pada 6%, kemudian menurun pada kadar lebih tinggi. – *Flow* seluruh variasi berada dalam batas standar, dengan performa paling seimbang pada kadar 4–6%. – *Marshall Quotient* (*MQ*) tertinggi terjadi pada 6%,

Sumber:Obaidat,dkk (2019), Mulatu,dkk (2020), Tandiabang,dkk (2022), Nasot,dkk (2024), Hadi,dkk (2025), Ahnaf (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Obaidat, dkk (2019)	Mulatu,dkk (2020)	Tandiabang,dkk (2022)	Nasot,dkk (2024)	Hadi,dkk (2025)	Ahnaf (2025)
		menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap Suhu ekstrim. -Ketahanan terhadap *rutting* dan kelelahan berkurang dengan penambahan polistirena. -Ketahanan terhadap retak akibat suhu rendah meningkat seiring bertambahnya kadar polistirena. -Campuran aspal termodifikasi ini dapat digunakan untuk lingkungan dengan suhu rendah, tetapi kurang optimal untuk jalan dengan beban lalu lintas tinggi. -Potensi pemanfaatan campuran ini dapat diterapkan pada area seperti tempat parkir, jalur pedestrian, atau sebagai material insulasi. (sumber: Obaiatdkk.,2019)	gradation yang digunakan dalam penelitian ini dapat diterapkan dalam desain *Marshall* tanpa mempengaruhi kinerja campuran secara signifikan. . (sumber:Mulatu dkk.,2020)	menunjukkan aspal lebih mengisi rongga antar agregat. -Pada kadar 8%, S*MS* mencapai 94,69%, melebihi batas minimal 90%, artinya campuran cukup tahan air.(sumber:Tandiabang dkk.,2022)	(sumber:Nasot dkk., 2024)	Parameter yang diukur meliputi stabilitas, kelelehan, *MQ*, *VITM*, *VMA*, dan *VFWA*. -Stabilitas tertinggi pada gradasi atas (2366,5 kg), diikuti gradasi tengah (1445 kg) dan bawah (1291 kg). Semua -Kelelehan terbesar pada gradasi atas (4,0 mm), kemudian gradasi tengah (3,3 mm) dan bawah (3,2 mm). Semua sesuai standar. -Densitas tertinggi gradasi atas (2,576 gr/cc), gradasi tengah (2,399 gr/cc), dan bawah (2,225 gr/cc). Gradasi tengah masih layak secara struktural. -*VITM* memenuhi standar, dengan gradasi atas 6%-7%, tengah 5,2%-6,5%, dan bawah 4,8%-5,5%. -*VMA* di bawah standar minimal	menunjukkan *Flow* dan stabilitas campuran paling optimal – Densitas meningkat hingga kadar 6%, menjadi titik paling padat pada seluruh variasi. – *VITM* menurun pada kadar 6%, menandakan rongga udara lebih kecil dan pemadatan lebih baik. – *VMA* menunjukkan kecenderungan meningkat pada kadar optimal, tetap dalam kisaran aman desain *Superpave*. – *VFWA* tertinggi pada kadar 6%, menunjukkan pengisian rongga oleh aspal lebih maksimal. – *IRS* meningkat hingga kadar 6%,

Sumber:Obaidat,dkk (2019), Mulatu,dkk (2020), Tandiabang,dkk (2022), Nasot,dkk (2024), Hadi,dkk (2025), Ahnaf (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Aspek	Obaidat, dkk (2019)	Mulatu,dkk (2020)	Tandiabang,dkk (2022)	Nasot,dkk (2024)	Hadi,dkk (2025)	Ahnaf (2025)
						15%, dengan nilai 5%-7% (atas), 4,5%-6,5% (tengah), dan 5%-5,5% (bawah). -*VFWA* juga rendah dari standar 65%, dengan rentang 5,6%-7% (atas), 4,7%-6,5% (tengah), dan 4,4%-5,5% (bawah). -Gradasi atas paling optimal untuk lalu lintas berat, tapi gradasi tengah tetap layak sebagai alternatif karena performanya cukup mendekati gradasi atas dan lebih baik dari gradasi bawah.(sumber:hadi dkk., 2025)	menunjukkan ketahanan terhadap kerusakan akibat air lebih baik dibanding kadar lainnya. – *ITS* juga mencapai nilai tertinggi pada 6%, menandakan ketahanan tarik dan retak meningkat signifikan. – Variasi 6% *Styrofoam* menghasilkan performa terbaik pada seluruh aspek utama: stabilitas, densitas, *MQ*, *VITM*, *VMA*, *VFWA*, *IRS*, dan *ITS*. – Dengan demikian, 6% merupakan kadar paling optimal untuk peningkatan kinerja campuran *Superpave* baik dari sisi volumetrik, struktural, maupun durabilitas.(sumber: Ahnaf (2025)

Sumber:Obaidat,dkk (2019), Mulatu,dkk (2020), Tandiabang,dkk (2022), Nasot,dkk (2024), Hadi dkk (2025), Ahnaf (2025)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan susunan struktur yang dibangun di atas tanah dasar yang telah melalui proses perlakuan tertentu. Struktur ini terdiri atas beberapa lapisan yang berfungsi menahan serta menyebarkan beban lalu lintas kendaraan ke tanah dasar. Lapisan tersebut juga berperan dalam memperkuat tanah dasar agar tidak mengalami deformasi yang signifikan.

Menurut Nawir dkk. (2025), perkerasan jalan berfungsi untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar, mencegah terjadinya deformasi, dan menyediakan permukaan yang aman serta nyaman bagi pengguna jalan. Oleh karena itu, perkerasan harus memiliki kekuatan struktural yang memadai, kemampuan distribusi beban yang baik, ketahanan terhadap keausan, daya cengkeram yang optimal, ketahanan terhadap air, serta efisiensi dalam proses konstruksi dan pemeliharaannya.

3.2 Jenis Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan di indonesia terdiri dari 3 jenis menurut bahan ikat dan karakteristik material yang digunakan, yaitu perkerasan lentur (*flexibel pavement)* , Perkerasan rigid (*rigid pavement*) dan perkerasan komposit (*composite pavement*), sebagai berikut.

1. Perkerasan lentur (*flexibel pavement*)

   Perkerasan ini menggunakan bahan ikat berupa beton aspal atau asphalt concrete (AC) yang dicampur dengan agregat bergradasi sesuai ketentuan. Jenis perkerasan ini memiliki karakteristik campuran yang bersifat lentur dan mampu beradaptasi terhadap beban lalu lintas.

2. Perkerasan rigid (*rigid pavement*):

   Merupakan perkerasan dengan bahan ikat *Portland Concrate Cement* (PCC)

yang dibentuk seperti pelat yang terbuat dari semen dengan dan agregat dengan gradasi tertentu dan dapat ditambahlan tulangan. Perkerasan ini memiliki karakteristik campuran yang kaku atau *rigid*.

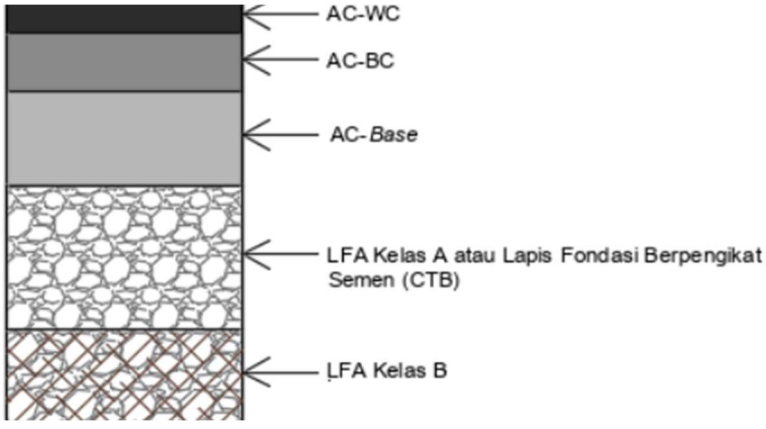
3. Perkerasan komposit (*composite pavement*):

   Merupakan Perkerasan dengan bahan ikat dengan kombinasi antara *Asphalt Concrate* (AC) dan *Portland Concrate Cement* (PCC) dengan melapisi *Asphalt Concrate* (AC) diatas *concrate slab* yang akan dilakukan perbaikan mutu atau rehabilitasi atau sebaliknya.

3.3 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan jenis konstruksi perkerasan yang tersusun atas material pengikat berupa aspal cair atau aspal beton, serta campuran agregat bergradasi. Kelenturan perkerasan ini berasal dari kombinasi aspal dan agregat bergradasi yang berfungsi menyalurkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya.

Menurut Nawir dkk. (2025), perkerasan lentur memiliki karakteristik lapisan dan material yang fleksibel karena dirancang untuk mendistribusikan beban ke lapisan yang berada di bawahnya melalui prinsip tegangan yang relatif seragam dan lendutan yang tidak seragam. Material pengikat yang digunakan pada lapisan permukaannya adalah asphalt concrete (AC). Adapun Lapisan Perkerasan jalan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Lapisan Perkerasan Lentur
(sumber: Bina Marga,2024)

Menurut Nawir dkk. (2025) Pada perkerasan lentur, memiliki lapisan-lapisan yang terdiri atas:

1. Lapisan Permukaan (*Surface Course*)

   Lapisan ini berada pada *wearing course* (WC) dan berfungsi menahan keausan akibat lalu lintas. Permukaannya dapat berupa friction course atau leveling course, sedangkan pengikatnya berada pada binder course (BC) dengan bahan asphalt concrete (AC). Lapisan surface course ini dirancang tahan aus, tahan cuaca, dan memberi daya cengkeram yang baik.

2. Lapis Pondasi Atas (*Base Course*)

   Lapisan ini merupakan bagian penting perkerasan jalan yang tersusun dari material granular seperti batu pecah atau pasir batu (sirtu) dan berfungsi menahan serta menyebarkan beban kendaraan. Berdasarkan sifatnya, lapisan ini terdiri atas tipe unbound tanpa bahan pengikat dan tipe bound yang distabilisasi menggunakan aspal atau semen portland agar lebih kuat dan tahan lama.

3. Lapisan Pondasi Bawah (*Sub-Base Course*):

   Terdiri dari material granular dengan kualitas rendah, yang berperan sebagai perbaikan kondisi tanah dasar dan penopang strukur yang ada diatasnya.

4. Tanah Dasar (*Subgrade*):

   Tanah alami yang sudah mengalami proses stabilisasi dan pemadatan. Untuk kondisi tanah yang kurang stabil biasanya dicampur dengan kapur.

3.4 Bahan Penyusun Perkerasan

3.4.1 Agregat

Agregat merupakan suatu material yang berbentuk butiran-butiran, memiliki karakteristik fisik padat dengan ukuran dan bentuk yang beragam. Agregat berfungsi sebagai pengisi dan bagian dari struktur yang menjadi kekuatan atau penopang utama dari sebuah perkerasan. Agregat diperoleh dari alami atau olahan (buatan). Agregat memiliki beragam jenis yaitu agregat kasar, agregat halus, dan *filler* .

Menurut penelitian oleh Telehala, (2023), agregat atau material granular

merupakan bahan dengan struktur butiran keras dan padat. Material ini terdiri atas berbagai komponen, seperti batu bulat, batu pecah, abu batu, serta pasir yang berfungsi sebagai *filler*. Dalam konstruksi perkerasan jalan, agregat memiliki peranan krusial sebagai komponen utama, di mana komposisinya mencapai sekitar 90–95% berdasarkan berat total campuran, atau sekitar 75–85% jika dihitung berdasarkan volumenya.

Berdasarkan Bina Marga 2018 revisi 2, Agregat yang digunakan dalam perkerasan jalan yaitu sebagai berikut:

1. Agregat Kasar
   a. Tidak lolos pada ayakan No. 4 (4,75 mm).
   b. Harus berasal dari batu pecah dengan ukuran nominal sesuai jenis campuran yang direncanakan.

Adapun persyaratan agregat kasar pada Tabel 3.1 sesuai dengan Bina Marga 2018 revisi 2 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Persyaratan Pemeriksaan Agregat Kasar

Pengujian			Metode Pcngujian	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	SNI 2417:2008	Maks. 6%
		500 putaran		Maks. 30%
	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal			SNI 2439:2011	Min.95%
Butir Pecah pada Agregat Kasar		SMA	SNI 7619:2012	100/90 *)
		Lainnya		*95/90* *)
Partikcl Pipih dan Lonjong		SMA	SNI 18287:2016 Pcrbandingan 1: 5	Maks. *5%*
		Lainnya		Maks. 10%
Material lolos Ayakan No.200			SNI *ASTM* C 117: 2012	Maks. 1 %

*) 100/90 menunjukkan bahwa 100% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah

satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah atau lebih **) 95/90 menunjukkan bahwa 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih. Sumber: Bina Marga (2018) revisi 2

2. Agregat Halus

a. Lolos ayakan No. 4 (4,75 mm).

b. Dapat berasal dari pasir alami atau hasil pengayakan batu pecah.

Adapun persyaratan agregat halus dapat dilihat melalui Tabel 3.2 sesuai Bina Marga 2018 revisi 2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Persyaratan Pemeriksaan Agregat Halus

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

Sumber: Bina Marga (2018) Revisi 2

3. *Filler* (Bahan Pengisi)

a. Berupa debu, batu kapur, semen, atau abu terbang.

b. Mengandung material yang lolos ayakan No. 200 (75 mikron atau 0,075 mm) minimal 75% dari berat sendiri dan 3% dari agregat kering.

3.4.2 Aspal

Aspal berfungsi sebagai bahan pengikat yang menjaga agregat tetap menyatu serta mengisi rongga antarbutir agar campuran stabil. Direktorat Jenderal Bina Marga (1997) dalam Nasot dkk. (2022) menjelaskan bahwa aspal adalah material berwarna hitam hingga coklat tua, bersifat cair kental pada suhu tinggi dan mengeras pada suhu ruang, serta merupakan residu dari proses penyulingan minyak bumi. Salah satu karakteristik utamanya adalah viskositas, yang memungkinkan aspal tetap elastis dan mempertahankan kekentalannya selama digunakan. Adapun

spesifikasi aspal penetrasi 60/70 yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Tabel 3.3 sebagai berikut.

Tabel 3.3 Persyaratan Aspal Penetrasi 60/70

No.	Nilai Persyaratan	Jenis Pengujian	Standar
1	≥ 1,0	Berat Jenis	SNI 2441:2011
2	60-70	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011
3	≥ 100	Daktilitas pada 25 °c (cm)	SNI 2432:2011
4	≥ 232	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011
5	≥ 48	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011
6	≥ 99	Kelarutan dalam *TCE* (%)	SNI 2438:2015

Sumber: Bina Marga (2018) Revisi 2

3.5 Campuran *Superpave*

3.5.1 Spesifikasi *Marshall Superpave*

Menurut Ji dkk. (2023) Gradasi campuran *Superpave* dalam desain campuran aspal berperan untuk mengurangi deformasi plastis dan retak dini akibat beban lalu lintas yang berulang. Dalam metode ini, gradasi agregat ditetapkan dengan batas kontrol maksimum dan minimum, serta zona terlarang tidak digunakan karena tidak berpengaruh secara signifikan untuk ketika melalui zona larangan (Hadi dkk., 2025). Adapun spesifikasi *Superpave* sesuai SHRP 1994 (A-407) dapat dilihat pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

Tabel 3.4 Spesifikasi *Superpave*

No	Kriteria Perencanaan	Nilai
1.	*VITM*	3-5
2.	*VMA*	> 15
3.	*VFWA*	> 65
4.	*Flow*	2-4
5.	Stabilitas	> 800
6.	*MQ*	≥ 250

Sumber: SHRP 1994 (A-407)

Berdasarkan dokumen SHRP 1994, informasi mengenai gradasi agregat dalam campuran *Superpave* yang ada dalam beberapa tabel sebagai berikut.

a. Agregat kasar yaitu tertahan pada saringan 2.36 mm.
b. Agregat halus yaitu lolos dari saringan 2.36 mm.
c. *Filler* yaitu lolos dari saringan 75 μm atau 0,075 mm

3.5.2 Gradasi Agregat *Superpave*

Tabel gradasi agregat pada sistem *Superpave* menunjukkan batas kendali untuk setiap bukaan saringan, termasuk area *restricted zone* yang secara teoritis sebaiknya dihindari. Untuk campuran dengan ukuran nominal maksimum 12,5 mm, digunakan saringan maksimum 19 mm sesuai pedoman SHRP (1994) A-407. Namun, hasil kajian Hadi dkk. (2025) menunjukkan bahwa gradasi optimal justru berada pada rentang tengah meskipun melewati *restricted zone*. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan gradasi tengah tanpa mempertimbangkan zona larangan. Tabel 3.5 berikut menyajikan spesifikasi *Superpave* berdasarkan SHRP (1994) A-407.

Tabel 3.5 Spesifikasi *Superpave* untuk Maksimal Agregat Nominal 12,5 mm

Ukuran Saringan (mm)	Minimum (%)	Maksimum (%)
19	100	100
12,5	90	100
9,5	78	90
2,36	28	58
1,18	14.57	33.21
0,600	7.97	25
0,300	4.56	17
0,075	2	10
pan	0	0

sumber: SHRP-A-407(1994)

3.6 Limbah *Styrofoam* Sebagai Penambahan Aspal

3.6.1 Aspal

Menurut Tandiabang dkk. (2022) Aspal merupakan material berbentuk cair dengan tingkat kekentalan tinggi ketika berada pada suhu leleh, namun akan mengalami pengerasan saat mencapai suhu ruang. Material ini diperoleh sebagai residu dari proses penyulingan minyak bumi. Salah satu karakteristik utama aspal adalah viskositasnya yang khas. Sepanjang masa pakainya, aspal bersifat elastis serta tetap mempertahankan tingkat kekentalannya. Dengan demikian *Styrofoam* akan memberikan sifat yang sama dengan aspal yaitu terjadi kelelehan pada suhu 100 ^{o}C dan menjadi padat kaku ketika berada pada suhu ruang. Sehingga dengan sifat yang mirip, *Styrofoam* dapat menjadi bahan penambahan Aspal. Kemudian apabila *Styrofoam* diberikan sebagai bahan penambahan aspal memiliki kapasitas untuk meningkatkan nilai *Flow* aspal, meningkatkan perkuatan untuk mengurangi *cracking ,* kerusakan *fatigue*, *rutting*, dan menurunkan propabilitas kerusakan akibat terkelupasnya aspal.

3.6.2 *Styrofoam*

Menurut Crespo dkk. (2022), *Styrofoam* atau Expanded *Polystyrene* (*EPS*) merupakan salah satu jenis plastik berbahan dasar *polystyrene* yang banyak digunakan dalam berbagai kebutuhan, terutama sebagai wadah makanan sekali pakai. Material ini memiliki sifat ringan, kaku, dan mampu memberikan isolasi termal yang baik, sehingga umum dimanfaatkan dalam industri pengemasan. *EPS* termasuk ke dalam polimer dengan kode SPI tipe 6, di mana sekitar 98% massanya terdiri atas udara dan hanya sekitar 2% berupa material padat. Komposisi tersebut menjadikannya sangat ringan namun tetap memiliki ketahanan benturan yang cukup baik.

Secara kimiawi, *polystyrene* merupakan polimer yang tersusun dari monomer stirena (C_8H_8) yang membentuk rantai karbon panjang dengan cincin benzena sebagai gugus utama dalam setiap unit polimernya. Struktur ini memberikan sifat kaku pada material dan membuatnya mampu bertahan terhadap berbagai kondisi lingkungan. Dalam proses pembentukan *EPS*, ditambahkan agen pengembang

seperti pentana (C_5H_{12}) sehingga *polystyrene* dapat mengembang dan menghasilkan struktur berpori yang ringan.

Penggunaan kadar *Styrofoam* pada penelitian ini mengacu pada persentase 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%, sesuai dengan penelitian Tandiabang dkk. (2022). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* dapat meningkatkan karakteristik volumetrik pada campuran aspal penetrasi 60/70, meskipun belum dilakukan pengujian yang lebih mendalam terkait aspek kekuatan dan durabilitas campuran tersebut.

Dalam penelitian ini, limbah *Styrofoam* dimanfaatkan sebagai bahan tambah pada aspal, yaitu bahan yang digunakan untuk meningkatkan dan memperkuat karakteristik serta kinerja aspal. Persentase *Styrofoam* yang digunakan berkisar antara 2–8% dari berat aspal cair, yang sebelumnya dihitung berdasarkan Kadar Aspal Optimal (KAO). Selanjutnya, kadar *Styrofoam* tersebut dicampurkan ke dalam aspal cair untuk proses pencampuran dan pengujian.

Untuk perhitungan kebutuhan *Styrofoam* pada setiap sampel dapat dilihat pada Persamaan 3.1 berikut.

$$\text{Berat } \textit{Styrofoam} \text{ (gr)} = \text{Kadar } \textit{Styrofoam}(\%) \text{ x berat aspal (gr)} \quad (3.1)$$

3.7 Metode Perhitungan Kadar Aspal pada Campuran *Superpave*

Salah satu tahap krusial dalam penelitian ini adalah menentukan kadar aspal optimum (KAO) yang akan diterapkan. Proses ini dilakukan dengan terlebih dahulu menetapkan gradasi agregat, kemudian menghitung proporsi total campuran guna memperoleh estimasi KAO yang sesuai. Untuk mendapatkan nilai KAO, dapat digunakan perhitungan berdasarkan Persamaan 3.2 berikut.

$$Pb = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045\ (\%FA) + 0{,}18(\%\textit{Filler}) + C \quad (3.2)$$

dengan:

Pb = etimasi jumlah aspal dalam campuran *Superpave,*
CA = agregat kasar tidak lolos saringan no.8,
FA = material agregat berukuran halus yang lolos saringan no. 8 dan

tertahan pada saringan nomor 200,

Filler = agregat halus tidak tertahan di saringan no.200, dan

Konstanta (C) = 0.5 – 1 untuk campuran Aspal Beton.

3.8 Karakteristik Pengujian *Marshall Standard*(*MS*)

3.8.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas pada campuran aspal diperoleh dari pembacaan langsung nilai yang ditunjukkan oleh alat *Marshall* selama proses pengujian berlangsung. Nilai ini menggambarkan kemampuan campuran dalam menahan beban yang bekerja di atasnya, termasuk ketahanannya terhadap deformasi serta batas beban maksimum sebelum mengalami kerusakan. Stabilitas umumnya dinyatakan dalam satuan kilogram. Apabila nilainya terlalu tinggi, campuran dapat menjadi terlalu kaku sehingga kurang mampu menyesuaikan tekanan kendaraan, yang pada akhirnya dapat memperpendek umur layan konstruksi perkerasan.

Perhitungan stabilitas dapat dilakukan menggunakan rumus yang tercantum dalam Persamaan 3.3 berikut.

$$Q = p \times q \tag{3.3}$$

dengan :

Q = nilai Stabilitas,

p = pembacaan *dial* stabilitas x kalibrasi *proving* ring, dan

q = nilai koreksi benda uji.

3.8.2 Kelelehan (*Flow*)

Nilai *Flow* diperoleh dengan membaca langsung indikator yang ditampilkan pada alat uji saat pengujian Marshall berlangsung. Nilai tersebut menunjukkan sejauh mana campuran aspal dapat mengalami deformasi sebelum mencapai kondisi gagal. Apabila nilai *Flow* terlalu rendah, campuran cenderung bersifat lebih kaku dan berisiko mengalami retak dini seiring bertambahnya umur layan.

3.8.3 *Void In Total Mix* (*VITM*)

VITM (Void in Total Mix) merupakan volume rongga udara yang terdapat di dalam campuran aspal setelah proses pemadatan selesai. Besarnya nilai *VITM* berkaitan erat dengan kemampuan campuran dalam menahan deformasi plastis. Apabila nilai *VITM* terlalu rendah, campuran aspal dapat kehilangan stabilitas. Sebaliknya, jika nilai *VITM* terlalu tinggi, porositas campuran menjadi berlebihan sehingga lebih mudah mengalami oksidasi dan cenderung rentan terhadap deformasi plastis.

Nilai *VITM* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.4 dan 3.5 berikut.

$$n = 100 - (100 - \frac{g}{h}) \tag{3.4}$$

$$h = 100 - \left(\frac{100}{\frac{\%agregat}{BJ\ agregat} - \frac{\%aspal}{BJ\ Aspal}}\right) \tag{3.5}$$

dengan:

n = nilai *VITM*,

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

h = berat jenis maksimum teoritis campuran (gr/cc).

3.8.4 *Marshall Quotient* (*MQ*)

Menurut Blash dkk. (2023), *Marshall Quotient* (*MQ*) merupakan menggambarkan ketahanan campuran aspal terhadap tegangan akibat tekanan roda kendaraan, terutama untuk lalu lintas berat. Semakin tinggi nilai *MQ*, semakin kuat perkerasan dalam menahan tegangan dari roda kendaraan, dengan kata lain *Marshall Quotient* merupakan tingkat kekakuan campuran beraspal karena semakin tinggi nilai *MQ* maka akan semakin kaku campuran tersebut.

Untuk mendapatkan nilai *MQ* dapat digunakan Persamaan 3.6 sebagai berikut.

$$MQ = \frac{S}{F} \quad (3.6)$$

Dengan :

MQ = *Marshall Quotient*; ketahanan campuran terhadap tegangan akibat tekanan roda kendaraan; tingkat kekakuan campuran,

S = stabilitas (*Stability)*, dan

F = kelelehan (*flow*).

3.8.5 *Void In Material Agregate* (*VMA*)

Menurut, *SHRP* (1994), *VMA* total dari volume benda uji dalam campuran aspal padat terdiri dari ruang kosong di antara partikel agregat, yang mencakup rongga udara serta volume aspal efektif. Untuk memperoleh nilai *VMA* dapat melalui Persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb\ xPS}{Gbs} \quad (3.7)$$

Dengan:

VMA = persentase volume bulk benda uji dalam campuran padat (%),

Gmb = berat jenis bulk dalam kondisi aspal padat,

Ps = proporsi agregat terhadap total berat campuran aspal, dan

Gbs = berat jenis bulk campuran aspal kondisi padat.

3.8.6 *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*)

VFWA merupakan ukuran volume rongga agregat mineral yang terisi oleh cairan aspal dalam campuran. Menurut Khateeb dkk. (2017), *VFWA* menunjukkan bagian dari *void in mineral aggregate* (*VMA*) yang terisi aspal. Mulatu dkk. (2020) menambahkan bahwa istilah ini digunakan secara khusus pada campuran aspal hangat untuk menggambarkan proporsi rongga yang terisi oleh aspal.

Untuk mendapatkan nilai *VFWA* atau *VFWA* dapat diperoleh melalui Persamaan 3.8 berikut.

$$VFWA = \frac{100\ (VMA - VITM)}{VMA} \quad (3.8)$$

Dengan :

VFWA = rongga yang dapat diisi oleh aspal,

VMA = volume rongga udara yang dapat diisi agregat dalam kondisi padat, dan

VITM = pori dalam aspal padat.

3.8.7 Densitas (*density*)

Nilai densitas diperoleh dari campuran yang telah dipadatkan. Semakin tinggi nilai densitas, semakin padat campurannya. Peningkatan kadar aspal membuat rongga campuran lebih terisi, sehingga menghasilkan campuran yang lebih rapat dan padat. Nilai atau densitas densitas dapat dihitung sesuai dengan Persamaan 3.9 hingga 3.10 sebagai berikut.

$$g = \frac{c}{f} \quad (3.9)$$

$$f = d - e \quad (3.10)$$

Dengan:

g = nilai Densitas (*Density*),

c = berat benda uji sebelum dilakukan perendaman (gr),

d = berat benda uji jenuh air (gr),

e = volume benda uji saat perendaman pada air (gr), dan

f = volume benda uji (cm^3).

3.9 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*)

Menurut AASHTO T 283 (2003), Indirect Tensile Strength (*ITS*) merupakan parameter yang digunakan untuk menilai ketahanan tarik tidak langsung suatu material. Pada perkerasan aspal, *ITS* berfungsi untuk mengukur kemampuan campuran dalam menahan gaya tarik sebelum terjadi retak, terutama akibat pengaruh kelembaban yang dapat memicu terjadinya stripping atau pelepasan ikatan antara agregat dan aspal.

Untuk menentukan nilai *ITS* dapat diperoleh melalui Persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$ITS = \frac{2000P}{h} \text{ x Ao} \quad (3.11)$$

Dengan:

ITS = *Indirect Tensile Strength* (kPa),

P = Beban maksimum (kPa),

h = Tinggi benda uji (mm), dan

Ao = konstanta.

3.10 Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*)

Pengujian ini dilakukan dengan melakukan perendaman campuran aspal selama 24 jam, yang berfungsi untuk mengetahui kekuatan aspal setelah dilakukan perendaman dengan air. Berikut merupakan Persamaan 3.12

$$IRS = \frac{S2}{S1} \text{ x } 100\% \quad (3.12)$$

Dengan :

S1 = nilai rerata stabilitas *Marshall* yang didapatkan setelah perendaman 0,5 jam (kg), dan

S2 = nilai rerata stabilitas *Marshall* yang didapatkan setelah perendaman 24 jam (kg).

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

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan indeks kekuatan tarik tidak langsung dengan merendam benda uji campuran aspal. Nilai Tensile Strength Ratio (*TSR*) minimum yang dapat diterima adalah sebesar 80%.

Berikut merupakan Persamaan 3.13 untuk mengetahui nilai *TSR*, sebagai berikut.

$$TSR = \frac{T2}{T1} \text{ x } 100\% \quad (3.13)$$

Dengan:

T1 = nilai *ITS* perendaman 0,5 jam (kPa), dan

T2 = nilai *ITS* setelah perendaman selama 24 jam (kPa).

3.12 Pemeriksaan *Penetration Index* (*PI*)

Menurut Gokalp (2022), PI merupakan parameter yang digunakan untuk menyatakan tingkat kepekaan termal aspal. Nilai PI diperoleh melalui integrasi hasil uji penetrasi dan titik lembek, dan secara langsung menggambarkan seberapa besar perubahan sifat fisik serta mekanik aspal akibat variasi suhu. Perhitungan nilai PI dilakukan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{PI} = \frac{1952 - 500 LogPen - 20S}{50 LogPen - SP -} \quad (3.14)$$

Dengan:

PI = *Penetrasi Index*,

Pen = Penetrasi, dan

SP = Titik Lembek (C^o) .

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian merupakan pendekatan yang digunakan peneliti untuk memperoleh variabel atau data yang diperlukan secara sistematis dan logis. Dalam studi ini, metode yang diterapkan adalah metode eksperimental. Pendekatan eksperimental dilakukan melalui serangkaian tahapan pengujian untuk memperoleh data yang selanjutnya dianalisis dan dibandingkan dengan standar acuan. Standar yang digunakan sebagai pembanding adalah Bina Marga 2018 revisi 2 dan Strategic Highway Research Program (SHRP, 1994).

4.2 Metode Pengambilan Sample

Sampel merupakan sejumlah perwakilan bahan yang digunakan untuk menunjukan karakteristik dari keseluruhan bahan yang akan di uji. Pada pengujian ini, aspal yang digunakan yaitu penetrasi 60/70 yang berasal dari Laboratorium Jalan Raya dengan campuran berjenis *Superpave* yang memiliki ukuran agregat maksimal nominal 12,5 mm dengan agregat yang digunakan berasal dari merapi .dan dicampur dengan limbah *Styrofoam* yang giling hingga lolos dari saringan no. 3/8" dan tertahan saringan no.16. Untuk persentase campuran *Styrofoam* yang akan menstubtitusikan aspal terbagi menjadi 0%, 2%, 4%, 6% dan 8% yang berasal dari journal milik Tandiabang dkk.(2022). Untuk pengambilan bahan sampel, dan limbah *Styrofoam* diambil dari Tempat Pembuangan Sampah (TPS) yang ada diseluruh area Daerah Istimewa Yogyakarta.

4.3 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data diawali dengan mengelompokkan benda uji menjadi beberapa jenis yaitu untuk menghitung Kadar Optimal Aspal (KAO) dan beberapa sampelsetiap kenaikian persentase *Styrofoam* menggunakan dengan *MS* untuk mengetahui nilai *VITM*, *VFWA*, *VMA* supaya

mengetahui karakteristik volumetrik dan *MQ* untuk mengetahui kekuatan struktur perkerasan jalan. Selain itu terdapat pengujian *Flow*, stabilitas dan *ITS* yang digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan struktur perkerasan jalan.

4.4 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Tahapan penelitian meliputi persiapan, pemeriksaan awal, perencanaan campuran, pembuatan benda uji, serta pelaksanaan pengujian sesuai prosedur yang telah ditetapkan.

4.4.1 Persiapan dan pemeriksaan Bahan Sampel

Persiapan bahan yaitu dengan melakukan pengujian terhadap bahan yang akan digunakan sebagai campuran dalam sample, tahapan ini dilakukan untuk mengetahui bahan yang akan digunakan sudah sesuai dengan spesifikasi dan persyaratan dari Bina Marga 2018 revisi 2. Untuk tahapan dalam penyiapan dan pemeriksaan bahan sampel sebagai berikut:

1. Pemeriksaan Agregat

   Agregat merupakan bahan yang menjadi kekuatan struktur utama dalam perkerasan jalan, selain itu agregat bertujuan sebagai bahan isi dan berperan dalam stabilitas aspal. Berikut merupakan tahapan pemeriksaan agregat:

   a. Pemeriksaan berat jenis dan daya serap terhadap air agregat kasar dan halus

      Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat Agergat kasar dan halus dalam kondisi semu, curah, *Saturated Surface Dry* (SSD) atau jenuh kering permukaan, dan daya serap agregat kasar terhadap air.

   b. Pemeriksaan kondisi agregat halus dengan *sand equivalent*

      Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kadar lumur dan debu yang menempel pada agregat halus.

   c. Pemeriksaan kelekatan antara agregat dengan aspal

      Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui nilai kelekatan antara agregat dengan aspal.

d. Pemeriksaan Keausan atau abrasi Agregat dengan metode *Los Angeles*

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat abrasi atau keausan agregat kasar terhadap gesekan dan kikisan akibat putaran mesin *Los Angeles.*

e. Pengujian saringan

Pengujian saringan ini bertujuan untuk mengetahui dan mengklasifikasikan agregat berdasarkan kelolosan atau tertahan pada suatu saringan berdasarkan spesifikasi yang ada dalam Bina Marga 2018 revisi 2 dan SHRP 1994.

2. Pemeriksaan *Filler*

Pemeriksaan *filler* yaitu bahan isi campuran aspal yang berwujud butiran halus atau partikel kecil. Spesifikasi sesuai peraturan Bina Marga 2018 revisi 2 dan SHRP 1994 A-407, *filler* memiliki spesifikasi ukuran yaitu lolos terhadap saringan no.200 atau berukuran 0,075 mm.

3. Pemeriksaan Aspal

Pemeriksaan aspal bertujuan untuk mengetahui sifat aspal yaitu memiliki kekentalan atau viskositas, memiliki kondisi fisik yang berubah akibat suhu ,namun tidak dapat memiliki sifat fisik yaitu menguap dan memiliki daya lekat. Dalam pengujian ini aspal yang digunakan yaitu aspal penetrasi 60/70. Berikut merupakan tahapan pemeriksaan aspal:

a. Pemeriksaan Berat jenis aspal

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui berat setiap meter kubik (m^3) aspal yang digunakan sebagai bahan campuran sampel. Pengujian ini dilakukan dengan menimbang aspal dan air yang ada didalam piknometer.

b. Pengujian Penetrasi

Pengujian penetrasi bertujuan untuk mengetahui kekerasan cairan aspal dalam kondisi suhu 25 ° C atau suhu ruang dengan jarum yang berdiameter 0,1 mm yang diuji dengan waktu dan beban tertentu.

c. Pemeriksaan titik nyala dan bakar aspal

Pemeriksaan titik nyala dan bakar aspal ditujukan untuk mengetahui suhu

aspal tersebut pada titik nyala yaitu terjadi percikan api dan yaitu titik bakar yaitu aspal yang terbakar dalam waktu 5 detik pada permukaan.

d. Pengujian daktilitas aspal

Pemeriksaan daktilitas aspal bertujuan untuk mengetahui nilai kelenturan dan daya ikat antar aspal (kohesi) aspal dalam kondisi suhu 25 ° C dan dilakukan penarikan pada ujung aspal dengan kecepatan 500 mm/menit . kemudian mengukur panjang aspal akibat tarikan sebelum putus.

e. Pemeriksaan titik lembek

Pemeriksaan titik lembek bertujuan untuk mengetahui titik lembek dari cairan aspal yang akan digunakan sebagai sampel. Pada pemeriksaan ini titik lembek aspal dilihat berdasarkan awal mula suhu yang membuat kondisi aspal mulai berubah wujud menjadi lembek.

4. Pemeriksaan *Styrofoam*

Styrofoam yang digunakan yaitu lolos no.3/8" (9,5 mm) dan tertahan pada saringan no.16 (1,18 mm) terhadap berat aspal sesuai berat rencana.

4.4.2 Persiapan Alat

Dalam mendukung pengujian, setiap proses akan menggunakan Peralatan yang telah tersedia di Laboratorium Jalan Raya,Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Berikut merupakan alat yang akan digunakan dalam setiap tahapan pengujian:

1. Pemeriksaan Agregat
   a. Dalam pengujian berat jenis aspal pada agregat kasar menggunakan 1 set alat Spesific gravity and absorption of coarse aggregate ASTM-128/AASHTO T-86. Kemudian untuk agregat halus menggunakan mangkuk *stainless steel*, piknometer dan gelas ukur.
   b. Pada pengujian *sand equivalent* yaitu satu set alat penguji tabung *sand ekuivalent.*
   c. Pada pengujian kelekatan agregat dengan aspal, alat yang digunakan yaitu gelas beker, timbangan, wadah, oven, air suling, dan termometer. kemudian saringan ukuran ¼", 4#, dan 3/8".
   d. Pada Pengujian keausan agregat metode *Los Angeles*, Peralatan yang

digunakan yaitu satu set peralatan *Los Angeles.*

e. Pada Pengujian analisa saringan, digunakan peralatan berupa satu set saringan dan *vibrator*.

2. Pemeriksaan *Filler*

Pada pemeriksaan *filler*, peralatan yang digunakan yaitu vibrator dan saringan no.200 untuk menentukan kelayakan sesuai spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2.

3. Pemeriksaan Aspal

a. Pada pemeriksaan berat jenis aspal, peralatan yang digunakan yaitu piknometer, air suling, termometer, bejana gelas, Bak perendam yang dilengkapi pengatur suhu dengan ketelitian (25±0,1)°C. dan timbangan digital.

b. Pada pengujian penetrasi aspal, alat yang digunakan yaitu jarum berdiameter 0,1 mm, gelas dengan kapasitas 350 ml, stopwatch dan termometer

c. Pada pengujian titik nyala dan titik bakar menggunakan satu set alat uji titik nyala dan bakar aspal

d. Pada pengujian daktilitas aspal, peralatan yang digunakan yaitu termometer, bak kapasitas 10 L, alat khusus untuk penarik sampel dan cetakan sampel

e. Pada pengujian titik lembek digunakan peralatan berupa satu set alat pengujian titik lembek aspal.

4.4.3 Perencanaan Campuran Benda Uji

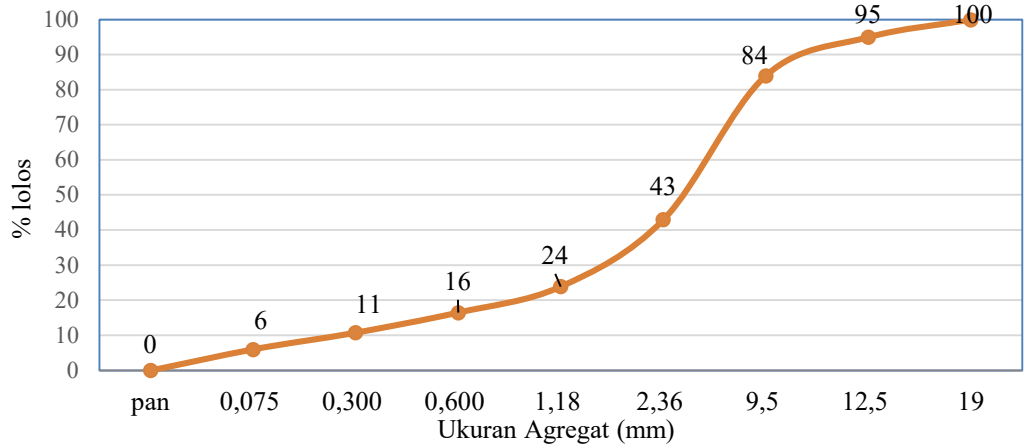
Kadar aspal yang akan digunakan memerlukan penentuan KAO. Kemudian, agregat dan *filler* memerlukan penyelidikan ukuran dan porsi agregat sesuai spesifikasi campuran aspal yang akan digunakan. Adapun rencana campuran gradasi agregat dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Gradasi *Superpave* Campuran Agregat Ukuran Maksimal Nominal 12,5 mm

Ukuran Saringan			Spesifikasi		Gradasi Rencana	
			Minimum (%)	Maksimum (%)	lolos (%)	tertahan (%)
3/4"	19	mm	100,00	100,00	100,00	0,00
1/2"	12,5	mm	90,00	100,00	95,00	5,00
3/8"	9,5	mm	78,00	90,00	84,00	16,00
No.8	2,36	mm	28,00	58,00	43,00	57,00
No.16	1,18	mm	14,57	33,21	23,89	76,11
No.30	0,600	mm	7,97	25	16,49	83,52
No.50	0,300	mm	4,56	17,00	10,78	89,22
No.200	0,075	mm	2,00	10,00	6,00	94,00
Pan		mm	0	0,00	0,00	0,00

Sumber: *Strategic Highway Research Program* (SHRP) A-407 (1994)

Berdasarkan Tabel 4.1, terdapat spesifikasi maksimum dan spesifikasi minimum untuk membatasi gradasi rencana supaya sesuai dengan spesifikasi. Untuk menunjukkan gradasi dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Gradasi Agregat *Superpave* Rencana

Setelah mengetahui gradasi rencana agregat *Superpave* , diperlukan perencanaan kadar aspal sesuai dengan nilai-nilai yang ada akan digunakan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO), dapat menggunakan Persamaan 3.2 yang telah diterangkan pada bagian sebelumnya sebagai berikut.

$$Pb = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045\ (\%FA) + 0{,}18(\%Filler) + C \quad \text{.....(3.2)}$$

Dengan:

Pb = estimasi jumlah aspal dalam campuran *Superpave,*
CA = agregat kasar tidak lolos saringan no.8,
FA = material agregat berukuran halus yang lolos saringan no. 8 dan tertahan pada saringan nomor 200,
Filler = Agregat halus tidak tertahan di saringan no.200, dan
Konstanta (C) = 0.5 – 1 untuk campuran aspal beton.

Dengan Menggunakan persamaan 3.2, maka perhitungan menghasilkan menghitung kadar aspal gradasi rencana sebagai berikut.

$$Pb = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045\ (\%FA) + 0{,}18(\%Filler) + C$$
$$Pb = 0{,}035\ (57\%) + 0{,}045\ (94\%\text{-}57\%) + 0{,}18(6\%) + 0{,}75$$
$$Pb = 5{,}49\ \%$$

Setelah melakukan perhitungan, kadar aspal yang dibutuhkan yaitu sebesar 5,49%, maka kadar optimum aspal (KAO) akan dihasilkan dari pengujian tingkatan kadar aspal yang digunakan yaitu menjadi 4,5%, 5%, 5,5%, 6% dan 6,5% dari total berat sampel campuran aspal sebesar 1200 gram. Untuk kadar penambahan bahan tambah limbah *Styrofoam* yang akan dilakukan perhitungan berdasarkan berat aspal rencana yang dipenambahankan dengan *filler* limbah *Styrofoam* yang telah ditentukan yaitu 0%, 2 %, 4%, 6%, dan 8 % dari berat aspal penetrasi 60/70 setiap sampel yang diambil dari persentase yang digunakan oleh Tandiabang, dkk (2022). Berikut merupakan kebutuhan gradasi agregat untuk menentukan KAO optimum campuran *Superpave*. Adapun kebutuhan agregat untuk mencari KAO dapat dilihat pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 4,5%

Ukuran Saringan			Spesifikasi (%)		Gradasi Rencana			
			Min	Maks	Lolos (%)	Tertahan (%)	Berat (gr)	Jumlah (gr)
3/4"	19	mm	100,00	100,00	100,00	0	0	0
1/2"	12,5	mm	90,00	100,00	95,00	5	57,30	57,30
3/8"	9,5	mm	78,00	90,00	84,00	16	126,06	183,36
No.8	2,36	mm	28,00	58,00	43,00	57	469,86	653,22
No.16	1,18	mm	14,57	33,21	23,89	76,11	219,00	872,22
No.30	0,600	mm	7,97	25,00	16,49	83,515	84,86	957,08
No.50	0,300	mm	4,56	17,00	10,78	89,22	65,38	1022,46
No.200	0,075	mm	2,00	10,00	6,00	94	54,78	1077,24
pan		mm	0	0,00	0,00	100	68,76	1146,00

Tabel 4.3 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan			Spesifikasi (%)		Gradasi Rencana			
			Min	Berat (gr)	Lolos (%)	Tertahan (%)	Berat (gr)	Jumlah (gr)
3/4"	19	mm	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	mm	90,00	100,00	95,00	5,00	57,00	57,00
3/8"	9,5	mm	78,00	90,00	84,00	16,00	125,40	182,40
No.8	2,36	mm	28,00	58,00	43,00	57,00	467,40	649,80
No.16	1,18	mm	14,57	33,21	23,89	76,11	217,85	867,65
No.30	0,600	mm	7,97	25,00	16,49	83,52	84,42	952,07
No.50	0,300	mm	4,56	17,00	10,78	89,22	65,04	1017,12
No.200	0,075	mm	2,00	10,00	6,00	94	54,49	1071,60
pan		mm	0,00	0,00	0,00	100	68,40	1140,00

Tabel 4.4 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 5,5%

Ukuran Saringan			Spesifikasi (%)		Gradasi Rencana			
			Min	Maks	Lolos (%)	Tertahan (%)	Berat (gr)	Jumlah (gr)
3/4"	19	mm	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	mm	90,00	100,00	95,00	5,00	56,7	56,70
3/8"	9,5	mm	78,00	90,00	84,00	16,00	124,74	124,74
No.8	2,36	mm	28,00	58,00	43,00	57,00	464,94	464,94

Lanjutan Tabel 4.4 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 5,5%

Ukuran Saringan			Spesifikasi (%)		Gradasi Rencana			
			Min	Maks	Lolos (%)	Tertahan (%)	Berat (gr)	Jumlah (gr)
No.16	1,18	mm	14,57	33,21	23,89	76,11	216,71	216,71
No.30	0,600	mm	7,97	25,00	16,49	83,52	83,97	83,97
No.50	0,300	mm	4,56	17,00	10,78	89,22	64,69	64,69
No.200	0,075	mm	2,00	10,00	6,00	94,00	54,2052	68,04
pan		mm	0,00	0,00	0,00	100,00	68,04	1134,00

Tabel 4.5 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan			Spesifikasi (%)		Gradasi Rencana			
			Min	Maks	Lolos (%)	Tertahan (%)	Berat (gr)	Jumlah (gr)
3/4"	19	mm	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	mm	90,00	100,00	95,00	5,00	56,40	56,40
3/8"	9,5	mm	78,00	90,00	84,00	16,00	124,08	180,48
No.8	2,36	mm	28,00	58,00	43,00	57,00	462,48	642,96
No.16	1,18	mm	14,57	33,21	23,89	76,11	215,56	858,52
No.30	0,600	mm	7,97	25,00	16,49	83,52	83,53	942,05
No.50	0,300	mm	4,56	17,00	10,78	89,22	64,35	1006,40
No.200	0,075	mm	2,00	10,00	6,00	94	53,92	1060,32
pan		mm	0,00	0,00	0,00	100	67,68	1128,00

Tabel 4.6 Gradasi *Superpave* Rencana dengan Kadar Aspal 6,5%

Ukuran Saringan			Spesifikasi (%)		Gradasi Rencana			
			Min	Maks	Lolos (%)	Tertahan (%)	Berat (gr)	Jumlah (gr)
3/4"	19	mm	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	mm	90,00	100,00	95,00	5,00	56,10	56,10
3/8"	9,5	mm	78,00	90,00	84,00	16,00	123,42	179,52
No.8	2,36	mm	28,00	58,00	43,00	57,00	460,02	639,54
No.16	1,18	mm	14,57	33,21	23,89	76,11	214,41	853,95
No.30	0,600	mm	7,97	25,00	16,49	83,52	83,08	937,04
No.50	0,300	mm	4,56	17,00	10,78	89,22	64,01	1001,05
No.200	0,075	mm	2,00	10,00	6,00	94	53,63	1054,68
pan		mm	0	0,00	0,00	100	67,32	1122,00

Setelah mengetahui masing-masing kebutuhan tingkatan kadar aspal yang akan digunakan dalam pengujian KAO, untuk mengetahui kebutuhan jumlah sampel yang pengujian KAO dapat dilihat pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Kebutuhan Benda Uji untuk Mengetahui KAO

Kadar Aspal (%)	pengujian *Marshall*
4,5	3
5	3
5,5	3
6	3
6.5	3
Total sampel	15
Total	15

Apabila nilai KAO telah didapatkan dari pengujian tingkatan kadar aspal, maka KAO akan digunakan pada setiap sampel pengujian dengan tingkatan persentase penambahan bahan tambah limbah *Styrofoam* terhadap aspal penetrasi 60/70 dengan rincian sampel setiap pengujian tertera pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8 Rincian Kebutuhan Benda Uji Pada Setiap Pengujian Berdasar Kadar *Styrofoam* Terhadap Aspal

Pengujian	Kadar Subtitusi Aspal dengan Limbah *Styrofoam* (%)				
	0	2	4	6	8
MS	3	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3	3
Total sampel	12	12	12	12	12
total	60				

Sehingga berdasarkan Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 untuk memulai pengujian, maka pembuatan sampel berjumlah 75 buah.

4.4.1 Pembuatan Benda Uji

Setelah mengetahui berat komposisi agregat dan kadar aspal yang digunakan, pada tahap pembuatan benda uji, langkah awal yaitu melakukan penyiapan dan

melakukan penimbangan pada masing-masing bahan campuran supaya proporsi sesuai. Kemudian, untuk bahan penambahan limbah *Styrofoam* yang akan digunakan lolos terhadap saringan no.3/8" (9,5 mm) dan tertahan pada saringan no.16 (1,18 mm) terhadap berat aspal sesuai berat rencana.

Pada pengujian penyaringan agregat yang akan digunakan sebagai material, langkah awal yaitu melakukan pengujian saringan terhadap nomor saringan yang sesuai dengan gradasi rencana. kemudian melakukan penimbangan agregat yang tertahan pada masing-masing saringan dan menyimpan pada masing-masing wadah sesuai jumlah porsi sampel.

Kemudian, supaya sampel ternampur dengan baik, pembuatan sampel memerlukan tahapan yaitu sebagai berikut:

1. Melakukan pemanasan aspal hingga aspal mencapai suhu 150 ^{o}C
2. Aspal penetrasi 60/70 dicampur dengan limbah *Styrofoam* pada kadar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat aspal. *Styrofoam* dimasukkan ke dalam aspal cair dan diaduk hingga larut. Berdasarkan Atakan dkk. (2021), pencampuran dilakukan pada suhu 150°C hingga homogen dan dipanaskan dalam oven selama 2 jam. Untuk efisiensi waktu, penulis memanaskan campuran pada suhu 150°C dengan api lebih besar selama 30 menit sambil terus diaduk hingga tercampur dengan aspal.
3. Panaskan agregat yang telah rencanakan sesuai kebutuhan agregat dengan wajan dan kompor.
4. Tuangkan cairan aspal ke dalam agregat yang telah dipanaskan kemudian melakukan pengadukan hingga agregat dan aspal dapat tercampur secara keseluruhan.
5. Mempersiapkan cetakan atau *mold* dengan membersihkan dan mengoles pada bagian dalam dengan pelumas atau oli.
6. Memotong kertas berbentuk benda uji dan meletakkan pada dasar *mold*, kemudian isi *mold* dengan hasil campuran aspal *Superpave* dengan mengisi setiap 1/3 bagian kemudian menumbuk sebanyak 25 kali dan mengulanginya hingga penuh. Kemudian berikan selembar kertas pada permukaan aspal
7. Lakukan pemadatan dengan menaruh *mold* dan benda uji ke mesin pemadat

dengan masing-masing sisi ditumbuk 75 kali.

8. Lepaskan benda uji dari mesin pemadat, kemudian tunggu hingga suhu menurun
9. Lepaskan benda uji dari *mold* dengan alat *hydraulic pump ejector* dan melepaskan kertas yang menempel pada benda uji
10. Melakukan penandaan atau kodefikasi pada benda uji

4.4.2 Pelaksanaan Pengujian *Marshall*

Pengujian *Marshall* bertujuan untuk mengetahui nilai campuran aspal berupa *VFWA*, *VITM*, *VMA*, *MQ*, Stabilitas, dan Densitas. Terdapat beberapa tahapan dalam pengujian *Marshall* sebagai berikut:

1. Menyiapkan serta membersihkan semua alat yang akan digunakan sebelum prosespengujian dimulai.
2. Menggunakan kaliper untuk mengukur tinggi benda uji pada tiga titik yang berbeda.
3. Menimbang benda uji dalam kondisi kering setelah dibiarkan pada suhu ruang.
4. Merendam benda uji selama 20 sampai 24 jam pada suhu ruang guna mencapai kondisi jenuh, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat beratnya.
5. Mengelap benda uji dengan kain hingga mencapai kondisi SSD, lalu menimbangnya kembali untuk mendapatkan berat SSD.
6. Memasukkan benda uji ke dalam waterbath selama 30 menit dengan suhu terjaga pada 60°C.
7. Mempersiapkan mesin *Marshall* secara lengkap bersama dial, serta mengolesi breaking head dengan oli agar siap digunakan.
8. Mengambil benda uji dari waterbath dan menempatkannya ke dalam breaking head, kemudian memasang dial *Flow* dan meningkatkan breaking head sampai cincin penguji menyentuh permukaan benda uji. Menyetel posisi jarum pada dial stabilitas dan *Flow* agar menunjukkan angka nol sebelum pembebanan.

9. Menyalakan mesin dan mengamati proses pembebanan hingga jarum pada dial stabilitas menunjukkan nilai maksimum. Kemudian, mencatat hasil pengujian dari dial stabilitas dan dial *Flow* secara teliti.

4.4.3 Pelaksanaan Pengujian *ITS*

Untuk melaksanakan Pengujian *ITS*, terdapat beberapa tahapan yang dapat dilihat sebagai berikut.

1. Mengukur tinggi dan diameter benda uji di tiga sisi benda uji
2. Merendam pada *waterbath* selama 30 menit atau 0,5 jam pada suhu 60°C
3. Menempatkan benda uji secara hati-hati ke dalam mesin *ITS* untuk proses pengujian.
4. Menyalakan mesin *ITS*, kemudian mengamati pergerakan dial dan mencatat setiap data yang dihasilkan.

4.4.4 Pelaksanaan Pengujian *IRS*

Untuk melaksanakan Pengujian *IRS*, terdapat beberapa tahapan yang dapat dilihat sebagai berikut.

1. Membersihkan benda uji dari sisa kotoran hasil pembuatan sampel agar tidak mengganggu proses pengujian.
2. Mengukur tinggi benda uji di tiga sisi menggunakan kaliper, lalu menimbangnya dalam kondisi kering udara.
3. Merendam benda uji selama 20–24 jam pada suhu ruang untuk mencapai kejenuhan, lalu menimbangnya saat berada di dalam air.
4. Mengelap benda uji dengan kain hingga mencapai kondisi SSD, lalu menimbang ulang untuk memperoleh berat SSD-nya.
5. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 24 jam untuk proses pemanasan awal sebelum pengujian.
6. Menyiapkan mesin *Marshall* dan dial, lalu mengolesi oli pada breaking head agar pengujian berjalan lancar.
7. Mengambil benda uji dari waterbath, meletakkannya pada breaking head, lalu meningkatkan breaking head hingga menyentuh cincin penguji.

8. Mengatur jarum dial *Flow* dan stabilitas pada angka nol, lalu menghidupkan mesin dan mencatat nilai maksimum yang ditunjukkan oleh kedua dial tersebut saat proses pembebanan berlangsung.

4.4.5 Pelaksanaan Pengujian *TSR*

Untuk melaksanakan Pengujian *TSR*, terdapat beberapa tahapan yang dapat dilihat sebagai berikut.

1. Menyiapkan semua peralatan yang diperlukan untuk pengujian.
2. Membuat benda uji sesuai proporsi campuran berdasarkan nilai KAO hasil uji *Marshall*.
3. Merendam benda uji dalam waterbath bersuhu 60°C selama 24 jam, lalu menyimpannya di suhu ruang selama 24 jam.
4. Menempatkan benda uji ke dalam mesin *TSR*.
5. Menyalakan mesin, membaca dial, dan mencatat hasil pengujian.

4.5 Analisa Data

Setelah melakukan serangkaian pengujian, Langkah selanjutnya yaitu dengan melakukan pengolahan data yang telah didapatkan dari pengujian untuk mendapatkan parameter-parameter hasil uji secara menyeluruh. Adapun analisis data yang dilakukan meliputi hal-hal sebagai berikut.

4.5.1 Analisa Data untuk penujian karakteristik *Marshall Standard*(*MS*)

Untuk melaksanakan pengolahan data, maka memerlukan beberapa nilai untuk melakukan perhitungan sebagai berikut.

1. Berat sampel kondisi kering udara (gram)
2. Berat sampel kondisi SSD (gram)
3. Berat sampel kondisi di dalam air (gram)
4. Dimensi ketebalan Sampel
5. Nilai *dial* saat pengujian stabilitas (kg)
6. Nilai *dial* saat pengujian *Flow* (mm)

Untuk menghitung parameter-parameter yang dibutuhkan dalam Karakteristik *Marshall*, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

1. Berat jenis (BJ) Agregat

Untuk menghitung berat jenis agregat, dapat menggunakan persamaan 4.1 berikut.

$$\text{BJ Agregat} = \frac{(A\ x\ F1)+(B2-F2)}{100} \quad (4.1)$$

dengan:

A = kadar agregat kasar (%),

B = kadar agregat halus (%),

F1 = berat jenis agregat kasar (gr/cm^3), dan

F2 = berat jenis agregat halus (gr/cm^3).

2. Berat jenis (BJ) Aspal

menghitung berat jenis Agregat dapat menggunakan persamaan 4.1 berikut.

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

dengan:

A = berat wadah piknometer dan penutup (gr),

B = berat wadah piknometer dan air (gr),

C = berat wadah piknometer dan aspal (gr), dan

D = berat wadah piknometer berisi air dan aspal (gr).

3. Nilai stabilitas dapat diperoleh melalui Persamaan 3.2
4. Nilai *Flow* diperoleh dari hasil nilai bacaan dial *Flow*.
5. Nilai *VITM* diperoleh melalui Persamaan 3.3 dan 3.4.
6. Nilai *Marshall Quotient* diperoleh melalui Persamaan 3.5
7. Nilai *VMA* diperoleh melalui Persamaan 3.6
8. Nilai *VFWA* diperoleh melalui Persamaan 3.7
9. Nilai Density diperoleh melalui Persamaan 3.8 dan 3.9.

4.5.2 Analisa Data untuk penujian *ITS*

Nilai *ITS* diperoleh melalui Persamaan 3.10

4.5.3 Analisa Data untuk penujian *IRS*

Nilai *IRS* diperoleh melalui Persamaan 3.12

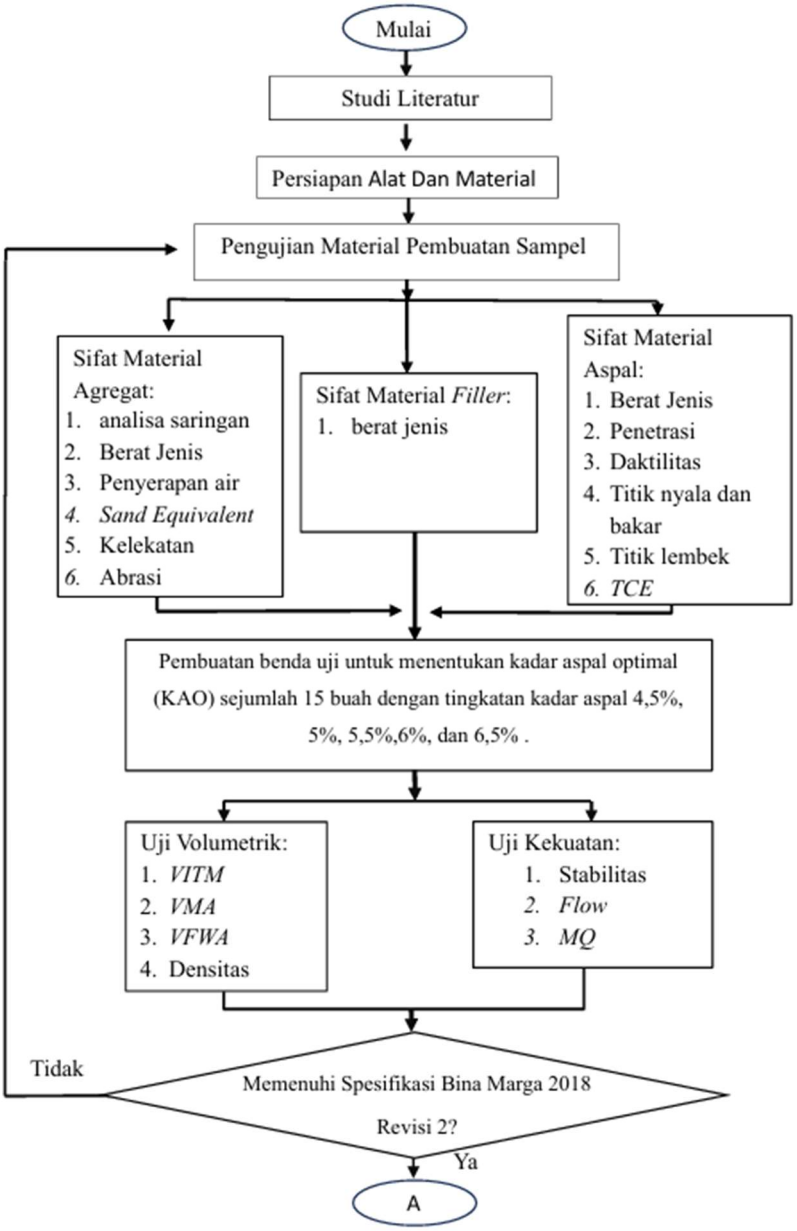
4.5.4 Analisa Data untuk penujian *TSR*

Nilai *TSR* diperoleh melalui Persamaan 3.13

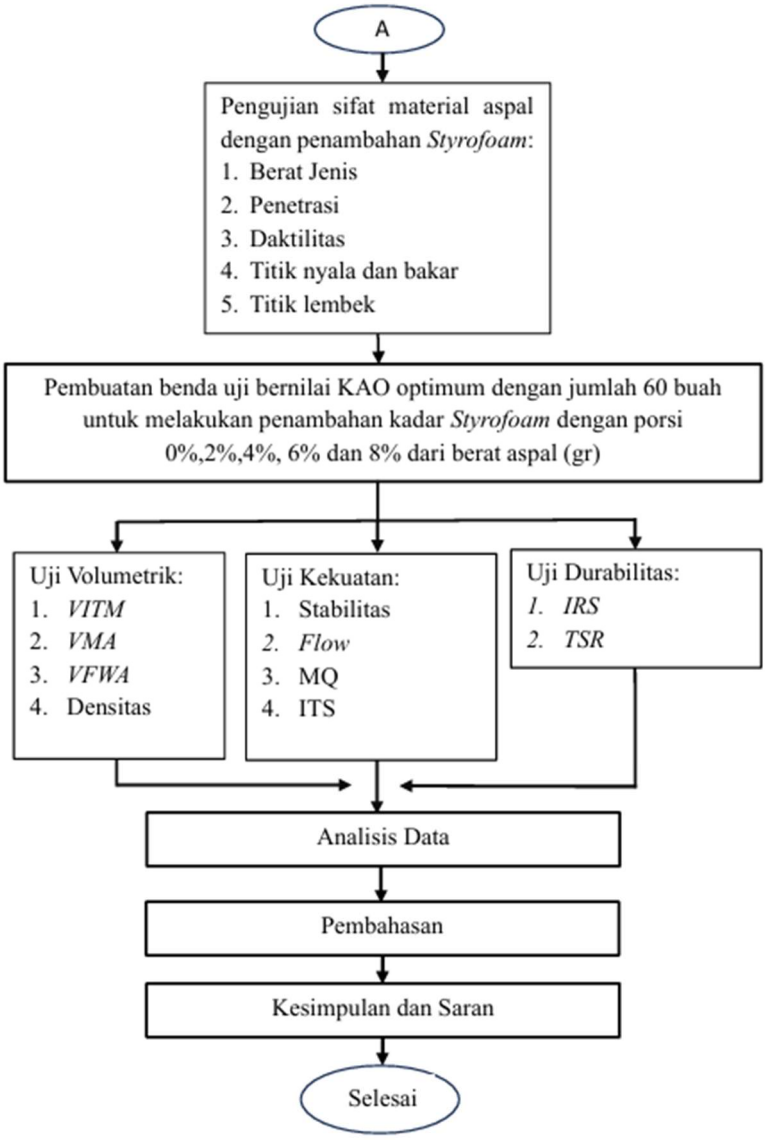
4.5.5 Analisa Data untuk perhitungan PI

Nilai PI diperoleh melalui Persamaan 3.14

4.6 *Flow Chart* Penelitian



Gambar 4.2 *Flow Chart* Pengujian



Lanjutan Gambar 4.2 *Flow Chart* Pengujian

BAB V
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Penelitian

Setelah melaksanakan penelitian ini, didapatkan hasil yang diperoleh melalui masing-masing pengujian yang telah dilaksanakan sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian cairan aspal yang dilakukan pada laboratorium jalan raya Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, telah didapatkan karakteristik aspal penetrasi 60/70 yang dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut.

Tabel 5.1 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Berat jenis	≥1,0	1,025	Memenuhi
Penetrasi (0,1 mm)	60/70	63,6	Memenuhi
Daktilitas (cm)	≥100	150	Memenuhi
Titik nyala (°C)	≥232	332	Memenuhi
Titik Bakar (°C)	≥232	339	Memenuhi
Titik lembek (°C)	≥48	49	Memenuhi
Penetrasi Index (PI)	-	-0,88	
Kelarutan TCE (%)	≥99	99	Memenuhi

Pengujian cairan aspal pen 60/70 dengan penambahan kadar *Styrofoam* 2% didapatkan karakteristik aspal yang dapat dilihat pada Tabel 5.2 sebagai berikut.

Tabel 5.2 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 2 %

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Berat jenis	≥1,0	1,078	Memenuhi
Penetrasi (0,1 mm)	60/70	62,3	Memenuhi
Daktilitas (cm)	≥100	110	Memenuhi
Titik nyala (°C)	≥232	345	Memenuhi
Titik Bakar (°C)	≥232	355	Memenuhi
Titik lembek (°C)	≥48	49,5	Memenuhi
Penetrasi Index (PI)	-	-0,80	

Pengujian cairan aspal pen 60/70 dengan penambahan kadar *Styrofoam* 4% didapatkan karakteristik aspal yang dapat dilihat pada Tabel 5.3 sebagai berikut.

Tabel 5.3 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 4 %

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Berat jenis	≥1,0	1,119	Memenuhi
Penetrasi (0,1 mm)	60/70	61,80	Memenuhi
Daktilitas (cm)	≥100	104,5	Memenuhi

Lanjutan Tabel 5.3 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 4 %

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Titik nyala (°C)	≥232	349	Memenuhi
Titik Bakar (°C)	≥232	353	Memenuhi
Titik lembek (°C)	≥48	50	Memenuhi
Penetrasi Index (PI)	-	-0,57	

Pengujian cairan aspal pen 60/70 dengan penambahan kadar *Styrofoam* 6% didapatkan karakteristik aspal yang dapat dilihat pada Tabel 5.4 sebagai berikut.

Tabel 5.4 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 6 %

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Berat jenis	≥1,0	1,137	Memenuhi
Penetrasi (0,1 mm)	60/70	61,20	Memenuhi
Daktilitas (cm)	≥100	100,5	Memenuhi
Titik nyala (°C)	≥232	350	Memenuhi
Titik Bakar (°C)	≥232	355	Memenuhi
Titik lembek (°C)	≥48	51	Memenuhi
Penetrasi Index (PI)		-0,47	

Pengujian cairan aspal pen 60/70 dengan penambahan kadar *Styrofoam* 8% didapatkan karakteristik aspal yang dapat dilihat pada Tabel 5.5 sebagai berikut.

Tabel 5.5 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam* 8 %

Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Berat jenis	≥1,0	1,19	Memenuhi
Penetrasi (0,1 mm)	60/70	58,90	Tidak Memenuhi
Daktilitas (cm)	≥100	96,00	Tidak Memenuhi
Titik nyala (°C)	≥232	353	Memenuhi
Titik Bakar (°C)	≥232	355	Memenuhi
Titik lembek (°C)	≥48	52,5	Memenuhi
Penetrasi Index (PI)	-	-0,20	

5.1.2 Hasil Pengujian Agregat

Pada Penelitian ini, agregat yang digunakan dalam pembuatan sampel pengujian berasal dari laboratorium jalan raya Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia dengan hasil penyelidikan karakteristik dapat dilihat pada Tabel 5.6 hingga Tabel 5.8 sebagai berikut.

Tabel 5.6 Data Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat jenis	≥ 2,5	2,65	Memenuhi
2	Penyerapan air	≤ 3	1,62	Memenuhi
3	Uji Keausan	≤ 40	16,29	Memenuhi

Tabel 5.7 Data Pengujian Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat jenis	≥ 2,5	2,61	Memenuhi
2	Penyerapan air	≤ 3	2,48	Memenuhi
3	*Sand Equivalent (SE)* (%)	≥ 50	71,84	Memenuhi

Tabel 5.8 Data Pengujian Berat Jenis *Filler*

No	*Filler*	Hasil
1	Berat jenis *filler* abu batu	2,533

5.1.3 Hasil Pengujian untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran *Superpave*

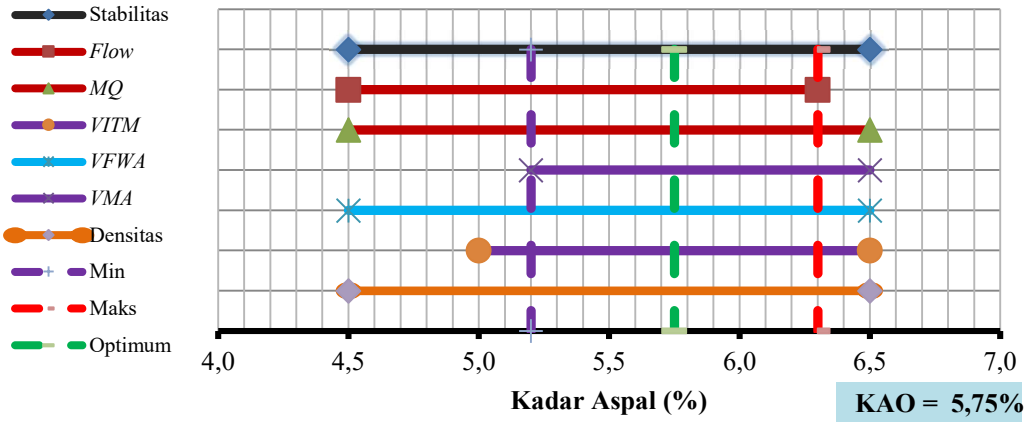
Pada pengujian yang digunakan untuk penentuan Kadar Aspal Optimum dapat menentukan melalui pengujian *MS,* yang menghasilkan nilai *VFWA*, *VMA*, *VITM*, *Flow*, Stabilitas, Densitas dan *Marshall Quotient*. Dalam pengujian KAO, didapatkan hasil pengujian yang dilihat pada Tabel 5.9 sebagai berikut.

Tabel 5.9 Data Hasil Pengujian Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*VFWA* (%)	*VITM* (%)	*VMA* (%)	*MQ* (kg/mm)	Densitas (gr/cc)
4,5	989,11	3,26	65,06	5,46	14,12	303,41	2,30
5	1.046,00	3,39	69,71	4,90	14,68	308,55	2,30
5,5	1.150,00	3,42	71,81	4,84	15,68	336,26	2,29
6	1.077,42	3,75	74,55	4,57	16,49	287,31	2,28
6,5	1.060,33	4,22	77,53	4,19	17,19	251,26	2,27
Spesifikasi	>800	2-4	65	3-5	>15	>250	

Pada pengujian ini diperoleh nilai untuk menentukan KAO untuk gradasi *Superpave* yang digunakan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5.9. KAO tersebut

merupakan hasil dari proses perhitungan dan analisis terhadap berbagai parameter volumetrik campuran, seperti *VITM*, *VMA*, dan *VFWA*, yang ditinjau telah sesuai dengan kriteria spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2. Kadar aspal optimum sebesar 5,75% ini kemudian dijadikan sebagai acuan dasar dalam pengujian selanjutnya untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan kadar limbah *Styrofoam* terhadap karakteristik campuran aspal *Superpave*, sebagaimana dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5.1 Grafik Penentuan Kadar Aspal Optimum pada Campuran *Superpave*

5.1.4 Hasil Pengujian untuk campuran *Superpave* Dengan Penambahan *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70

Pada pengujian campuran *Superpave* meliputi pengujian *MS*, *ITS*, *IRS* dan *TSR*. Pada pengujian ini telah ditentukan kadar limbah *Styrofoam* yang ditambahkan pada Aspal yang telah dihitung pada Kadar Aspal Optimum. Kadar *Styrofoam* yang digunakan yaitu 0%, 2%, 4%,, 6%, dan 8%. Berikut merupakan tabel hasil perhitungan kebutuhan *Styrofoam* dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut.

Tabel 5.10 Penentuan Berat Penambahan *Styrofoam*

KAO Optimum (%)	Berat Aspal (gr)	Kadar *Styrofoam*	Berat *Styrofoam* (gr)	Berat aspal+*Styrofoam* (gr)
5,75	69	0%	0	69

Lanjutan Tabel 5.10 Penentuan Berat Penambahan *Styrofoam*

KAO Optimum (%)	Berat Aspal (gr)	Kadar *Styrofoam*	Berat *Styrofoam* (gr)	Berat aspal+*Styrofoam* (gr)
5,75	69	2%	1,38	70,38
5,75	69	4%	2,76	71,76
5,75	69	6%	4,14	73,14
5,75	69	8%	5,52	74,52

Dengan adanya penambahan *Styrofoam* pada campuran aspal *Superpave* dengan aspal aspal pen 60/70 mendapatkan hasil pengujian dapar dilihat pada Tabel 5.11 hingga 5.14 berikut

Tabel 5.11 Data Hasil Pengujian *MS* Sesuai Kadar *Styrofoam*

Kadar (%)	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VITM* (%)	*VMA* (%)	*VFWA* (%)	Densitas (gr/cc)
0,0	911,65	3,62	251,84	4,60	15,90	73,67	2,28
2,0	1.092,00	3,27	333,94	4,02	15,49	76,32	2,30
4,0	1.564,00	2,84	550,70	3,71	15,22	77,78	2,30
6,0	1.648,00	2,44	675,41	3,59	15,10	78,43	2,31
8,0	1.564,00	2,50	625,60	3,81	15,30	77,39	2,30
Spesifikasi	800	2-4	65	3-5	15	250	

Tabel 5.12 Data Hasil Pengujian *IRS* Sesuai Kadar *Styrofoam*

Kadar (%)	Stabilitas (kg)		*IRS* (%)
	perendaman 0,5 jam	Perendaman 24 jam	
0	911,65	830,10	91,10
2	1092,76	1025,59	94,87
4	1564,25	1504,61	96,85
6	1648,81	1604,75	97,90

Lanjutan Tabel 5.12 Data Hasil Pengujian *IRS* Sesuai Kadar *Styrofoam*

Kadar (%)	Stabilitas (kg)		*IRS* (%)
	perendaman 0,5 jam	Perendaman 24 jam	
8	1564,25	1502,46	95,96
spesifikasi			>90%

Tabel 5.13 Data Hasil Pengujian *ITS* Sesuai Kadar *Styrofoam*

Kadar (%)	*ITS* (KPa)
0	604,33
2	643,89
4	720,26
6	785,63
8	716,13
spesifikasi	>600

Tabel 5.14 Data Hasil Pengujian *TSR* Sesuai Kadar *Styrofoam*

Kadar (%)	Stabilitas (kg)		*TSR* (%)
	perendaman 0,5 jam	Perendaman 24 jam	
0	604,33	493,63	81,68
2	643,89	548,37	85,17
4	720,26	630,77	87,58
6	785,63	697,63	88,80
8	716,13	614,42	85,80
spesifikasi			>80 %

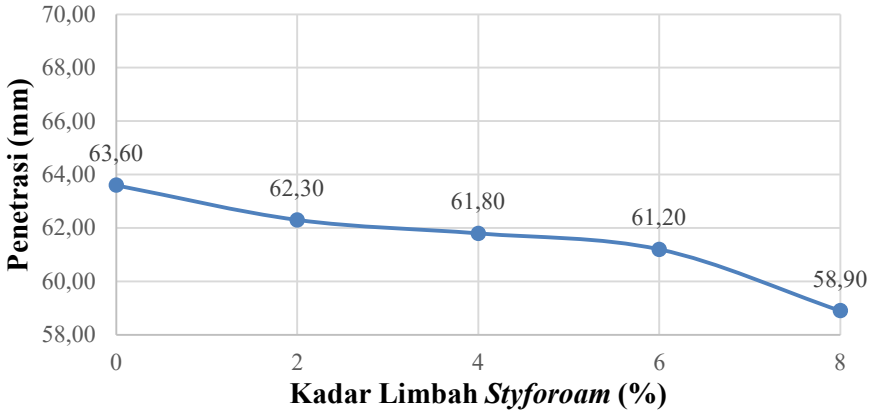
5.2 Pembahasan

5.2.1 Karakteristik Aspal

Berdasarkan pengujian didapatkan karekteristik aspal penetrasi aspal dapat dilihat sebagai berikut.

1. Penetrasi Aspal

Penetrasi aspal adalah ukuran seberapa dalam jarum standar dapat menembus permukaan sampel aspal dalam kondisi tertentu, yaitu dengan beban, suhu, dan waktu pengujian yang sudah ditetapkan. Tujuan pengujian ini yaitu mengetahui nilai kekerasan aspal. Hasil pengujian penetrasi dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut



Gambar 5.2 Grafik Nilai Penetrasi Aspal

Hasil penelitian ini menunjukkan nilai penetrasi yang cenderung menurun seiring dengan bertambahnya kadar limbah *Styrofoam* dalam aspal penetrasi 60/70. Nilai penetrasi tertinggi berada pada kadar *Styrofoam* 0% yaitu 63,6 mm, kemudian penetrasi terendah berada pada kadar *Styrofoam* 8% yaitu bernilai 58,9 mm. pengujian penetrasi yang telah didapatkan pada kadar 0% hingga 6% telah memenuhi standar Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu lebih dari 60 mm, sementara untuk 8% tidak memenuhi standar disebabkan oleh nilai penetrasi ada dibawah standar yaitu lebih atau minimal sama dengan 60 mm.

Penurunan nilai penetrasi apabila teramati dari kadar 0% yaitu 63,6 mm sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% penurunan menjadi 62,3 mm atau menurun 2,04% terhadap 0%, pada kadar 4% menjadi 61,8 mm atau menurun 2,83%, pada kadar 6% menjadi 61,2 mm atau menurun 3,77%, dan pada kadar 8% menjadi 59 mm atau menurun 7,39% dibanding kadar 0%. Berdasarkan data tersebut, kadar 8% memberikan perubahan paling signifikan terhadap nilai penetrasi.

Penurunan nilai penetrasi hingga kadar 6% terjadi akibat limbah *Styrofoam* berinteraksi dengan aspal, di mana *Styrofoam* larut sebagian ke dalam fraksi aromatik atau cairan pelumas aspal dan bereaksi dengan cairan maltene. Reaksi tersebut membentuk jaringan polimer yang mengembang (*swollen*) oleh fraksi maltene aspal. Jaringan ini mengisi ruang mikro di dalam aspal, menciptakan gaya adhesi. sehingga membuat strukturnya lebih padat dan keras.Akibatnya, jarum uji penetrasi tidak dapat menembus seberapa dalam pada aspal yang dimodifikasi *Styrofoam* dibandingkan dengan aspal murni.

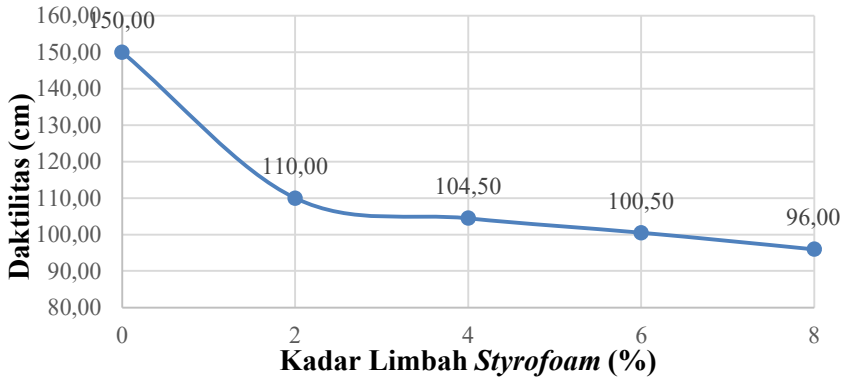
Penjelasan tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Polacco dkk. (2006), yang menjelaskan bahwa aspal hasil modifikasi dengan polimer membentuk struktur internal yang berupa fase polimer yang tersebar dan mengalami pembengkakan akibat menyerap bagian cair (maltenes) dalam aspal. Polimer ini tidak larut sepenuhnya, melainkan membentuk jaringan fisik yang memperkuat struktur aspal secara mikroskopis. Penyerapan cairan tersebut membuat jaringan ini berkembang menjadi massa padat kecil yang mengisi dan menguatkan ruang di dalam aspal. Diperkuat dengan penelitian yang dilakukan oleh murana dan olowosulu (2020) yang menjelaskan bahwa adanya peningkatan adhesi antara aspal dengan *Styrofoam* yang menyebabkan aspal lebih keras dan menurunkan penetrasi.

Penelitian ini memiliki hasil yang kesesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Atakan dkk, (2021) yang melakukan penambahan *Styrofoam* ke cairan aspal penetrasi 60/70 dengan kadar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dengan hasil terjadi penurunan nilai penetrasi dan Dahunsi dkk.(2025) yang melakukan modifikasi aspal dengan penambahan *Styrofoam* atau Expanded *Polystyrene* (*EPS*) sejumlah 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, dan 17,5%.

Dengan demikian, kadar *Styrofoam* yang disarankan untuk ditambahkan dalam aplikasi modifikasi aspal pen 60/70 yaitu pada kadar 6% dengan nilai 61,2 mm yang memiliki kekerasan lebih tinggi namun memiliki masih terdapat kelenturan. Hal tersebut berkaitan dengan stabilitas campuran yang berdampak pada stabilitas aspal akan semakin meningkat. Penggunaan kadar diatas 6% seperti 8% akan membuat campuran aspal menjadi lebih getas dan menurunkan stabilitas.

2. Daktilitas Aspal

Menurut SNI 2432:2011, daktilitas didefinisikan sebagai sifat pemuluran aspal yang diukur pada saat putus, yang menunjukkan kemampuan material aspal untuk mengalami peregangan sebelum terputus akibat gaya tarik. Dengan demikian, pengujian daktilitas bertujuan untuk menilai tingkat kelenturan atau keplastisan aspal melalui pengukuran panjang pemuluran spesimen yang dihasilkan oleh mesin uji hingga aspal mengalami putus. Hasil pengujian daktilitas dapat dilihat melalui Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Grafik Nilai Daktilitas Aspal

Berdasarkan hasil pengujian, nilai daktilitas yang diperoleh pada kadar penambahan *Styrofoam* 0% adalah sebesar 150 mm, kadar 2% sebesar 110 mm, kadar 4% sebesar 104,5 mm, kadar 6% sebesar 100,5 mm, dan kadar 8% sebesar 96 mm. Mengacu pada ketentuan Direktorat Jenderal Bina Marga (2018), nilai daktilitas minimum yang disyaratkan untuk aspal adalah 100 mm. Oleh karena itu, campuran aspal dengan kadar *Styrofoam* 0%, 2%, 4%, dan 6% masih memenuhi standar yang ditetapkan, sedangkan pada kadar 8% sudah tidak memenuhi persyaratan karena nilai daktilitasnya berada di bawah batas minimum.

Dari hasil penelitian ini, teramati dari kadar 0% yaitu 150 mm sebagai variable kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% penurunan menjadi 110 mm atau menurun 26,6% dengan kadar 0%, kemudian pada kadar 4% terjadi penurunan menjadi 104,5 mm atau menurun 30,3% dibanding 0%, pada kadar 6% terjadi penurunan menjadi 100,5 mm atau menurun sebanyak 33% dibanding kadar 0%, dan pada kadar 8% terjadi penurunan menjadi 96 mm atau menurun sebanyak 36%

dibandingkan kadar 0%. Berdasarkan data tersebut didapatkan 8% menjadi kadar yang signifikan dalam menurunkan daktilitas aspal.

Daktilitas menurun akibat adanya penambahan *Styrofoam* yang mengubah struktur dan sifat fisik aspal. *Styrofoam* adalah bahan polimer yang tidak larut, sehingga saat tercampur dengan aspal, ia membentuk partikel-partikel yang mengganggu keseragaman dan elastisitas aspal. Partikel ini menyerap dan mengikat fraksi cair aspal (maltene), sehingga membatasi kemampuan molekul aspal untuk bergerak bebas dan berelastisitas. Akibatnya, kemampuan aspal untuk mengalami regangan atau peregangan (daktilitas) menjadi berkurang. Struktur jaringan aspal yang dihasilkan menjadi lebih kaku dan kurang lentur seiring dengan penambahan *Styrofoam* .

penjelasan ini didukung oleh penelitian Behnood dan Gharehveran (2019), yang mengemukakan bahwa ketika polimer berbasis stirena dicampurkan ke dalam aspal, terbentuklah suatu jaringan polimer yang mengembang (*swollen polymer network*) dan memengaruhi perilaku elastis dari cairan aspal. Hal tersebut berhubungan dengan meningkatnya sifat kaku dari aspal. Dengan sifat kaku yang meningkat seiring bertambahnya polimer dengan aspal dapat berhubungan dengan penurunan daktilitas ini.

Hasil tersebut sesuai dengan penelitian Olowosulu dan Murana (2020), yang menunjukkan penurunan nilai daktilitas seiring dengan adanya penambahan *Styrofoam*. Selanjutnya terdapat penelitian yang dilakukan oleh Atakan dkk.(2021) yang menunjukkan kecenderungan penurunan nilai daktilitas seiring dengan pertambahan *Styrofoam*.

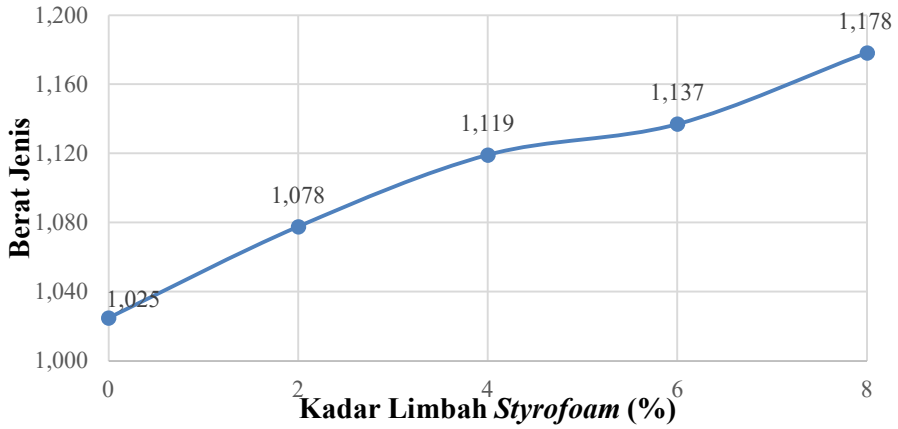
Hasil tersebut sesuai dengan penelitian Olowosulu dan Murana (2020), yang menunjukkan penurunan nilai daktilitas seiring dengan adanya penambahan *Styrofoam*. Selanjutnya terdapat penelitian yang dilakukan oleh Atakan dkk.(2021) yang menunjukkan kecenderungan penurunan nilai daktilitas seiring dengan pertambahan *Styrofoam*.

Penurunan daktilitas akan menyebabkan aspal menjadi kaku dan mudah untuk mengalami kerusakan, sehingga perlu adanya spesifikasi sebagai batasan nilai untuk daktilitas. Dalam penelitian ini spesifikasi dan standar yang digunakan

adalah Bina Marga 2018 revisi 2. Pada penelitian ini, nilai daktilitas terendah namun sesuai dengan standar yaitu kadar 6%. Pemilihan kadar terendah tersebut berdasarkan daktilitas yang rendah akan memiliki nilai stabilitas yang tinggi namun tetap memiliki tingkat kelenturan yang baik.

3. Berat jenis Aspal

Berat jenis memiliki peran yang penting untuk sifat campuran aspal. Metode yang digunakan untuk menentukan berat jenis aspal yaitu melalui perbandingan massa dengan volume aspal. Berat jenis yang didapatkan yaitu dengan penambahan *Styrofoam* pada aspal sebanyak 0% yaitu sebesar 1,025 ≥ 1; 2% yaitu 1,078 ≥ 1; 4% yaitu 1,119 ≥ 1 ; 6% yaitu 1,137 ≥ 1; 8% yaitu 1,178 ≥ 1. Berdasarkan hasil pengujian, dapat diketahui berat jenis aspal telah memenuhi standar yang ditetapkan sesuai Bina Marga 2018 revisi 2. Hasil pengujian berat jenis aspal dapat dilihat pada Gambar 5.4 sebagai berikut.



Gambar 5.4 Grafik Nilai Berat Jenis Aspal

Dari hasil tersebut didapatkan penambahan kadar *Styrofoam* akan meningkatkan berat jenis aspal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan limbah *Styrofoam* memberikan pengaruh nyata terhadap nilai berat jenis aspal penetrasi 60/70. Pada kadar 2%, berat jenis meningkat dari 1,025 menjadi 1,078, atau naik sebesar 5,17% dibandingkan kadar 0%. Selanjutnya pada kadar 4%, nilai berat jenis meningkat menjadi 1,119 (9,17%), dan pada kadar 6% naik menjadi 1,153 (12,49%). Namun, pada kadar 8% naik menjadi 1,178, atau 14,93% dari kadar 0%.

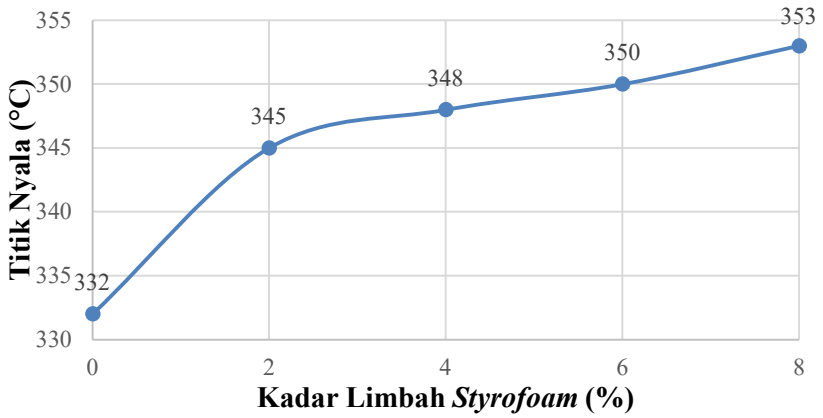
Peningkatan berat jenis ini dapat dijelaskan karena *Styrofoam* mengalami pelelehan parsial pada suhu pencampuran sehingga mampu mengisi celah mikro di antara molekul binder. Hal ini mengurangi rongga udara dan meningkatkan densitas campuran. Penjelasan ini selaras dengan penelitian Atakan dkk. (2021) yang menyatakan bahwa *Styrofoam* memiliki berat jenis sekitar 0,032 g/cm³ karena struktur materialnya yang didominasi oleh rongga udara. Pada proses pencampuran pada suhu tinggi, *Styrofoam* mengalami pelelehan sehingga udara internal tersebut keluar dan yang tersisa adalah fase *polystyrene* padat yang memiliki berat jenis jauh lebih tinggi dibandingkan bentuk *EPS* foam awal. Kondisi ini menyebabkan struktur campuran menjadi lebih kompak akibat berkurangnya kadar void, sehingga berat jenis campuran secara keseluruhan mengalami peningkatan. Selain itu, Desmond dkk. (2024) juga menjelaskan bahwa *polystyrene* mampu meningkatkan kohesi internal dan membuat struktur campuran lebih rapat.

Penelitian oleh Yousif dkk. (2024) juga mendukung hasil tersebut, menemukan bahwa interkoneksi antarpartikel dalam binder meningkat ketika aspal dimodifikasi polimer sehingga berat jenis meningkat. Dengan demikian, peningkatan pada berat jenis di kadar 6% dan 8% lebih disebabkan oleh berkurangnya rongga mikro dan meningkatnya densitas, bukan karena massa *Styrofoam* yang tinggi.

4. Titik Nyala Aspal

Titik nyala digunakan untuk menentukan suhu minimum di mana uap aspal dapat menyala sesaat ketika terkena sumber api. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai titik nyala aspal pada kadar 0% sebesar 330°C, kadar 2% sebesar 333°C, kadar 4% sebesar 337°C, kadar 6% sebesar 340°C, dan kadar 8% sebesar 342°C.

Nilai titik nyala yang meningkat menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* tidak menurunkan keamanan termal aspal, bahkan cenderung meningkatkan stabilitasnya terhadap suhu tinggi. Berdasarkan Bina Marga 2018 revisi 2, nilai titik nyala minimal adalah ≥230°C, sehingga seluruh kadar *Styrofoam* jauh di atas batas standar. Hasil pengujian titik nyala dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut.



Gambar 5.5 Grafik Nilai Titik Nyala Aspal

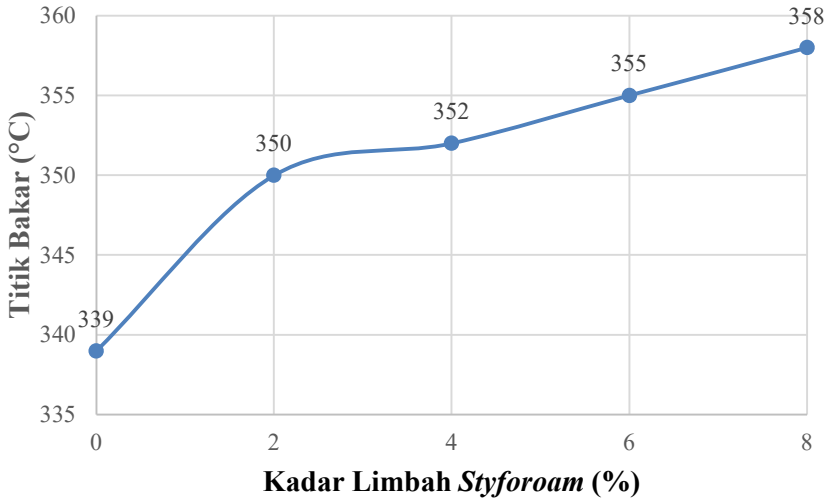
Pada mengujian ini menghasilkan nilai hubungan antara kadar limbah *Styrofoam* deangan titik nyala, seiring dengan peningkatan limbah *Styrofoam* maka titik nyala akan semakin tinggi. Nilai titik nyala awal pada kadar 0% sebesar 332°C sebagai variabel kontrol. Pada kadar 2% meningkat menjadi 345°C atau naik 3,92%, kadar 4% sebesar 348°C atau naik 4,82%, kadar 6% sebesar 350°C atau naik 5,42%, dan kadar 8% mencapai 353°C atau naik 6,33% dibanding kadar 0%. Dengan demikian, kadar 8% menunjukkan perubahan paling signifikan terhadap variabel kontrol.

Peningkatan tersebut disebabkan oleh Penambahan limbah *Styrofoam* atau *polystyrene* (*EPS*) ke dalam aspal menyebabkan komposisi campuran didominasi oleh molekul polimer berukuran besar, sehingga kadar senyawa ringan yang mudah menguap menjadi berkurang. Karena nilai titik nyala (*flash point*) sangat dipengaruhi oleh banyaknya komponen volatil, penurunan fraksi tersebut membuat suhu nyala aspal meningkat.

Sejumlah penelitian juga melaporkan bahwa peningkatan kadar *EPS* umumnya diikuti oleh kenaikan nilai *flash point* dan *fire point* pada campuran aspal. Volatil sendiri merupakan bagian yang ringan dan mudah menguap dari aspal. Semakin sedikit fraksi volatil, semakin tinggi titik nyala dan titik bakar aspal karena aspal menjadi lebih tahan terhadap panas dan pembakaran. Penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Khedaywi dkk. (2016) yang menambahkan *Styrofoam* kedalam *aspal* yang menghasilkan peningkatan titik nyala aspal.

5. Titik Bakar.

Titik bakar digunakan untuk menentukan suhu minimum di mana uap aspal tidak hanya menyala sesaat, tetapi terus menyala selama beberapa detik setelah terkena sumber api. Titik bakar suatu aspal ditandai dengan adanya api yang menyala minimal 5 detik. Hasil penelitian terkait titik bakar dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut.



Gambar 5.6 Grafik Nilai Titik Bakar Aspal

Pada mengujian ini, nilai titik bakar pada setiap kadar limbah *Styrofoam* telah memenuhi standar Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu 232 °C. Nilai titik nyala awal pada kadar Peningkatan titik bakar menunjukkan tren bertahap dari kadar 0% hingga 8%. Pada kadar 2% nilai titik bakar meningkat 3,24%, kadar 4% meningkat 3,83%, kadar 6% meningkat 4,72%, dan kadar 8% mengalami peningkatan tertinggi yaitu 5,60% terhadap nilai kontrol.

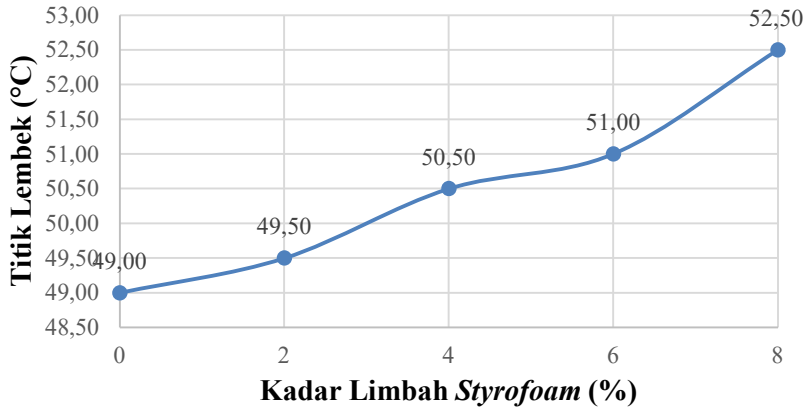
menghasilkan nilai hubungan antara kadar *Styrofoam* dengan titik bakar, seiring dengan peningkatan limbah *Styrofoam* maka titik nyala akan semakin tinggi. Hal tersebut berhubungan dengan titik bakar, karena suhu titik bakar akan berada diatas atau sama dengan titik nyala. Hal tersebut disebabkan oleh Penambahan *Styrofoam* atau *polystyrene* (*EPS*) ke dalam aspal menyebabkan komposisi campuran didominasi oleh molekul polimer berukuran besar, sehingga kadar senyawa ringan yang mudah menguap menjadi berkurang. Karena nilai titik bakar

(*fire point*) sangat dipengaruhi oleh banyaknya komponen volatil, penurunan fraksi tersebut membuat suhu titik bakar meningkat.

Polystyrene memiliki sifat tahan panas dengan struktur aromatik yang kokoh sehingga membantu menghambat proses pembakaran dini pada aspal. Penjelasan ini sejalan dengan temuan Khedaywi dkk. (2016) yang melaporkan bahwa modifikasi binder menggunakan *EPS* meningkatkan nilai *fire point* karena fraksi volatil berkurang. Hasil ini juga didukung oleh Desmond dkk. (2024) dan Yuniarti dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa *polystyrene* mampu meningkatkan ketahanan binder terhadap panas dan memperlambat degradasi termal. Oleh sebab itu, tren peningkatan titik bakar pada penelitian ini menggambarkan stabilitas termal yang semakin baik seiring bertambahnya presentasi *Styrofoam*.

6. Titik lembek

Titik lembek menunjukkan suhu saat aspal mulai melunak ketika dipanaskan dan berfungsi untuk menilai ketahanan aspal terhadap suhu tinggi di lapangan. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai titik lembek aspal pada kadar 0% sebesar 49°C, kadar 2% sebesar 49,5°C, kadar 4% sebesar 50°C, kadar 6% sebesar 51°C, dan kadar 8% sebesar 52,5°C. Nilai titik lembek hasil penelitian ini yang berada di atas batas minimal Bina Marga (2018) ≥ 48 °C menegaskan bahwa penambahan *EPS* efektif meningkatkan ketahanan termal aspal modifikasi. Hasil Pengujian titik lembek dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut.



Gambar 5.7 Grafik Nilai Titik Lembek Aspal

Berdasarkan nilai pengujian titik lembek aspal memperlihatkan bahwa titik lembek meningkat seiring dengan penambahan kadar limbah *Styrofoam*. Nilai titik lembek pada kadar 0% adalah 49°C sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% titik lembek meningkat menjadi 49,5°C atau naik 1,02% dibanding kadar 0%, kadar 4% menjadi 50,5°C atau naik 3,06%, kadar 6% sebesar 51°C atau naik 4,08%, dan kadar 8% mencapai 52,5°C atau naik 7,14% dibanding kadar 0%. Berdasarkan hasil tersebut, kadar 8% memberikan perubahan paling signifikan terhadap variabel kontrol.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa aspal menjadi lebih tahan terhadap suhu tinggi, karena *Styrofoam* memiliki sifat yang memperkuat struktur aspal dan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi akibat panas. Sehingga aspal memiliki kepekaan suhu lebih tinggi dibanding aspal tanpa penambahan *Styrofoam.*

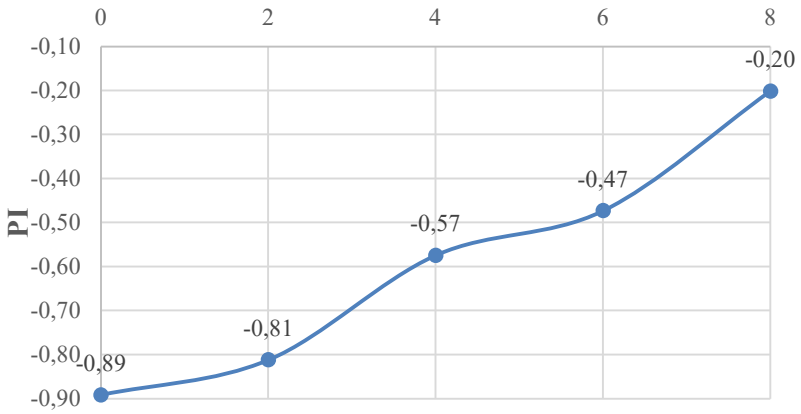
Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai titik lembek meningkat seiring dengan penambahan kadar limbah *polystyrene* (*EPS*) ke dalam aspal penetrasi 60/70. Peningkatan ini sejalan dengan temuan Baker dkk. (2016) yang melaporkan tren serupa, di mana semakin besar kadar *EPS* (hingga ≥ 6 %), nilai titik lembek cenderung naik akibat aspal yang lebih kaku dan kepekaan terhadap suhu yang lebih rendah.

Penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilaksanakan oleh Kaya (2023) yang melakukan studi eksperimental terhadap pengaruh penggunaan *Styrofoam* terhadap aspal. Hasil penelitian tersebut yaitu nilai titik lembek yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar *Styrofoam* yang ditambahkan pada aspal.

7. Kelarutan TCE

Pada pengujian kelarutan TCE dilakukan untuk mendapatkan kemurnian aspal. Pengujian ini dilaksanakan pada kadar 0% *Styrofoam* dengan nilai 99%, namun pada kadar 2%, 4%, 6%, dan 8% kadar *Styrofoam* tidak perlu dilaksanakan karena aspal sudah diketahui aspal yang digunakan bercampur dengan *Styrofoam* sehingga aspal tersebut tidak murni.

8. *Penetration Index* (PI)



Gambar 5.8 Grafik *Penetration Index* (PI)

PI menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya kadar *Styrofoam* dari 0% hingga 8%. Nilai PI awal sebesar –0,89 meningkat menjadi –0,81 pada 2%, kemudian naik menjadi –0,57 pada 4%, –0,47 pada 6%, dan mencapai –0,20 pada 8%. Peningkatan ini cukup signifikan, terutama pada rentang 2% ke 4% yang mencapai sekitar 29,6%, serta peningkatan total dari 0% ke 8% yang mencapai 57,4%. Perubahan ini menandakan bahwa campuran aspal mengalami penurunan sensitivitas terhadap temperatur.

Peningkatan PI tersebut berkaitan dengan perubahan sifat fisik aspal setelah penambahan *Styrofoam*. Aspal menjadi lebih keras karena struktur campuran menjadi lebih padat dan pergerakan molekul binder lebih terbatas. Kekerasan yang meningkat menyebabkan nilai penetrasi menurun, sedangkan stabilitas termal meningkat sehingga titik lembek juga cenderung naik. Perubahan pada kedua parameter ini berkontribusi pada kenaikan PI, yang menunjukkan bahwa campuran lebih stabil saat mengalami pemanasan.

Hasil ini selaras dengan penjelasan dalam penelitian Islam Gokalp (2022), di mana PI dihitung berdasarkan hubungan antara nilai penetrasi dan titik lembek. Pada campuran yang dimodifikasi dengan *Styrofoam*, kedua parameter tersebut berubah dan menghasilkan nilai PI yang lebih tinggi. Pola tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan *Styrofoam* memberikan pengaruh positif terhadap kestabilan termal campuran aspal.

5.2.2 Karakteristik Agregat Kasar

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaksanakan, diperoleh karakteristik agregat kasar sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat

Pengujian berat jenis dilakukan dengan menimbang contoh agregat pada tiga kondisi, yaitu jenuh kering permukaan (BJ), kering udara (BA), dan kering oven (BK). Dari hasil perhitungan diperoleh nilai berat jenis agregat kasar sebesar 2,65. Nilai tersebut berada di atas batas minimum yang disyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2, yakni ≥ 2,5, sehingga agregat ini dinyatakan memenuhi persyaratan.

2. Daya Serap Air Agregat

Kemampuan agregat dalam menyerap air yang masuk ke pori-porinya diukur melalui uji penyerapan air. Dari hasil pengujian diperoleh nilai penyerapan air sebesar 1,62%. Angka ini masih berada dalam rentang yang diizinkan oleh Bina Marga 2018 revisi 2, yaitu kurang dari 3%, sehingga agregat tersebut dapat dikategorikan layak digunakan.

3. Ketahanan Terhadap Keausan (Uji Los Angeles)

Uji keausan dilakukan untuk menilai ketahanan agregat terhadap abrasi dengan menggunakan mesin Los Angeles (LA). Nilai keausan yang diperoleh adalah 16,29%, dan hasil tersebut sesuai dengan standar Bina Marga 2018 revisi 2 yang mensyaratkan nilai maksimum 40%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat memiliki ketahanan aus yang baik dan memenuhi kriteria mutu yang ditetapkan.

5.2.3 Karakteristik Agregat Halus

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaksanakan, diperoleh karakteristik agregat halus sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat

Pada pengujian ini, berat jenis agregat halus ditentukan melalui proses penimbangan contoh uji dalam tiga kondisi, yaitu saat jenuh kering permukaan (BJ), saat terendam air (BA), dan setelah dikeringkan dalam oven (BK). Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai berat jenis agregat halus sebesar 2,61.

Nilai tersebut telah memenuhi ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2, yang mensyaratkan nilai minimum 2,5, sehingga agregat ini layak digunakan sebagai bahan campuran perkerasan.

2. Daya Serap Air Agregat

Kemampuan agregat halus dalam menyerap air ke dalam pori-porinya ditentukan melalui uji penyerapan air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai penyerapan air agregat halus sebesar 2,48%, masih berada dalam batas maksimum yang diizinkan oleh Bina Marga 2018 revisi 2, yaitu kurang dari 3%. Hal ini menandakan bahwa agregat memiliki tingkat porositas yang rendah dan kualitas yang baik.

3. Nilai *Sand Equivalent (SE)*

Pengujian *Sand Equivalent (SE)* dilakukan untuk mengetahui kadar kotoran halus, seperti debu dan lumpur, yang terdapat pada agregat halus. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai SE sebesar 71,84%, jauh di atas batas minimum yang ditetapkan Bina Marga 2018 revisi 2, yaitu ≥ 50%. Hasil ini mengindikasikan bahwa agregat halus memiliki kemurnian tinggi dan sedikit mengandung material pengotor.

4. Kadar *Filler*

Material *filler* berasal dari fraksi agregat halus yang lolos saringan No. 200. Dari hasil pemeriksaan diperoleh kadar *filler* sebesar 2,533%. ini menunjukkan bahwa fraksi halus pada agregat telah mencukupi untuk membantu pengisian rongga antar butir pada campuran beraspal, sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan densitas campuran.

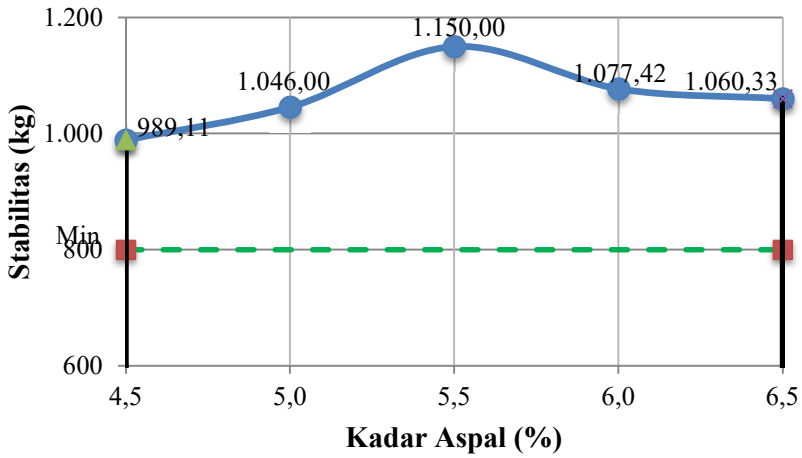
5.2.3 Penentuan KAO Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70

Penentuan KAO digunakan untuk mengetahui kadar aspal dengan karakteristik terbaik (optimum) yang akan digunakan dalam pengujian selanjutnya. Dalam penentuan kadar aspal optimum didapatkan melalui pengujian *MS* yang digunakan nilai Stabilitas, *Flow*, *VITM*, *VMA*, *VFWA*, Densitas dan *Marshall Quoitent.* Untuk hasil KAO dapat dilihat sebagai berikut.

1. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan campuran beraspal untuk menahan beban lalu

lintas hingga terjadi deformasi atau keruntuhan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya kekuatan maksimum yang dapat diterima oleh benda uji *Marshall* sebelum terjadi kegagalan plastis. Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan campuran memiliki daya dukung yang baik terhadap beban. Hasil pengujian stabilitas dapat dilihat melalui Gambar 5.8 berikut.



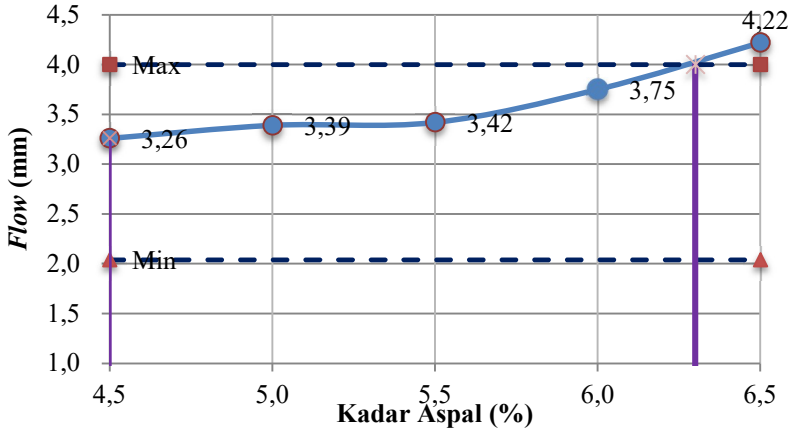
Gambar 5.8 Grafik Nilai Stabilitas KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

Berdasarkan Gambar 5.16, terlihat bahwa nilai stabilitas pada gradasi tengah yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 berada pada rentang kadar aspal 4,5%–6,5%. Nilai stabilitas mengalami peningkatan dari 989,00 kg pada kadar aspal 4,5% menjadi 1.150,00 kg pada kadar aspal 5,5%, kemudian menurun menjadi 1.060,33 kg pada kadar 6,5%. Kenaikan nilai stabilitas tertinggi berada pada kadar 5,5% menunjukkan bahwa campuran aspal yang digunakan untuk campuran sesuai dengan kebutuhan gradasi agregat. Namun setelah melewati kadar tersebut, nilai stabilitas mulai menurun akibat kadar aspal yang terlalu tinggi, sehingga daya ikat antar agregat berkurang. Dengan demikian, kadar aspal optimum untuk memperoleh stabilitas tertinggi pada gradasi tengah terjadi pada kadar 5,5% dengan nilai sebesar 1.150,00 kg.

2. Kelelehan (*Flow*)

Flow merupakan besarnya perubahan bentuk vertikal benda uji pada saat beban maksimum tercapai. Tujuan dari pengujian *Flow* adalah untuk mengetahui

tingkat kelenturan campuran aspal terhadap beban lalu lintas. Nilai *Flow* yang terlalu rendah menunjukkan campuran cenderung kaku, sedangkan nilai yang terlalu tinggi menunjukkan campuran mudah berubah bentuk atau mengalami deformasi . Hasil pengujian *Flow* dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut.

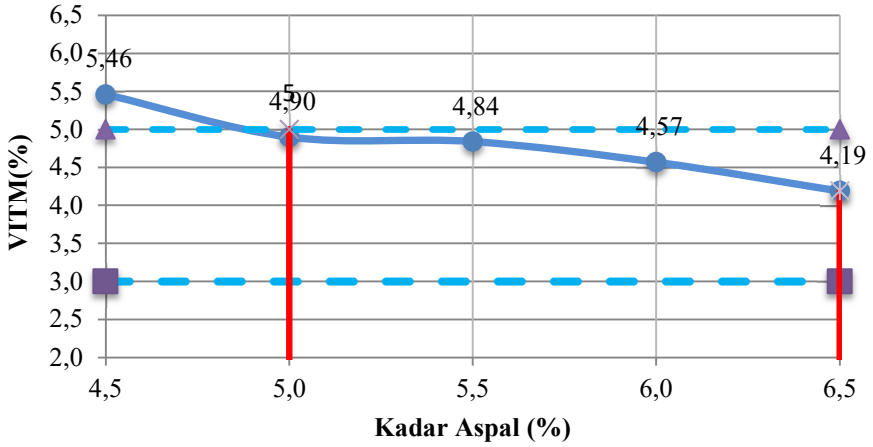


Gambar 5.9 Grafik Nilai *Flow* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

Berdasarkan Gambar 5.9, nilai *Flow* pada gradasi tengah menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal, yaitu dari 3,26 mm pada kadar aspal 4,5% dan tertinggi ada pada kadar 6,5% yaitu bernilai 4,22 mm. Nilai *Flow* 4,5% hingga 6% masih berada dalam batas spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2, yaitu antara 2–4 mm. Kenaikan nilai *Flow* menunjukkan bahwa campuran semakin plastis ketika kadar aspal bertambah. Pada kadar aspal di atas 6,5%, nilai *Flow* melebihi batas spesifikasi, yang menandakan bahwa campuran mulai lentur dan kehilangan tingkat kaku . Sehingga campuran aspal akan cenderung lembek.

3. *VITM*

Void In Total Mix (*VITM*) adalah volume rongga udara di dalam campuran aspal padat secara keseluruhan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat densitas campuran total tanpa membedakan *void* tersebut ada di antara agregat, di dalam binder, atau gabungan keduanya. Hasil pengujian *VITM* dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.

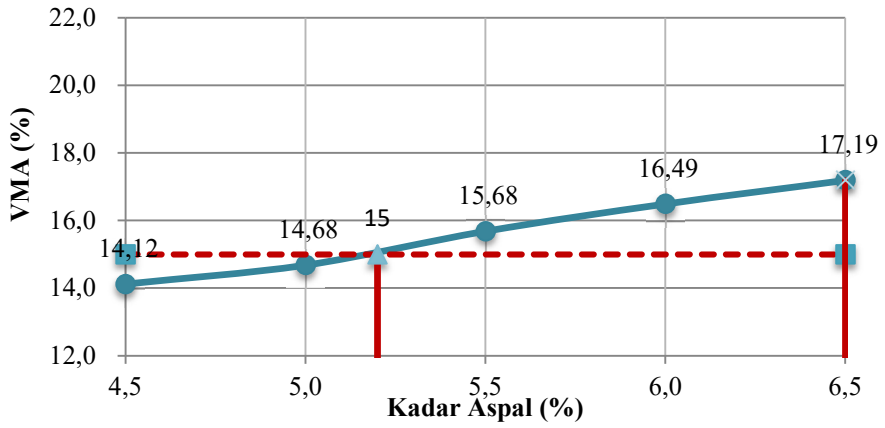


Gambar 5.10 Grafik Nilai *VITM* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

Berdasarkan Gambar 5.18, nilai *VITM* mengalami penurunan dari 5,46% pada kadar aspal 4,5% menjadi 4,19% pada kadar 6,5%. Penurunan ini menunjukkan bahwa campuran semakin padat seiring bertambahnya kadar aspal. Nilai *VITM* yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu pada kadar aspal 5% hingga 6,5%, dimana nilai *VITM* Berada pada 3%–5%. Dengan demikian, nilai *VITM* kadar aspal yang memenuhi adalah kadar aspal 5%-6,5% dapat dikatakan memiliki tingkat densitas yang baik karena masih berada pada batas yang disyaratkan. Namun nilai terendah berada pada kadar aspal 6,5% yaitu bernilai 4,19%.

4. *VMA*

Void in Mineral Aggregate (*VMA*) merupakan parameter penting dalam analisis campuran beraspal yang menggambarkan besarnya volume rongga di antara butiran agregat mineral yang tersedia untuk menampung aspal (binder) dan udara di dalam campuran. Nilai *VMA* menunjukkan sejauh mana ruang antarbutir agregat dapat terisi oleh aspal, sehingga sangat berpengaruh terhadap densitas, daya ikat, dan durabilitas campuran. Semakin tepat nilai *VMA* yang diperoleh, semakin baik pula keseimbangan antara rongga udara dan kadar aspal yang dibutuhkan untuk menghasilkan campuran yang stabil. Hasil pengujian *VMA* dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.

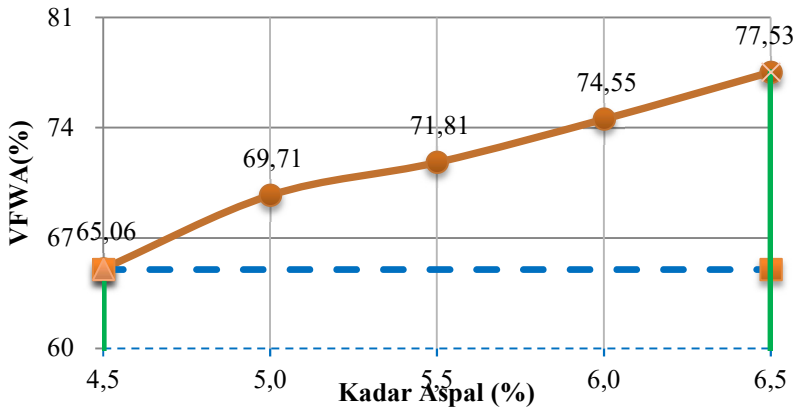


Gambar 5.11 Grafik Nilai *VMA* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

Berdasarkan Gambar 5.11, nilai *VMA* mengalami peningkatan dari 14,12% pada kadar aspal 4,5% menjadi 17,19% pada kadar aspal 6,5%. Nilai *VMA* yang diperoleh pada semua kadar aspal telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu lebih dari 15%. Hal ini menunjukkan bahwa ruang antar butir agregat dalam campuran sudah cukup untuk menampung kadar aspal yang digunakan. Nilai *VMA* yang telah memenuhi standar tersebut terjadi pada kadar aspal 5,2%-6,5%. Namun nilai *VMA* tertinggi yaitu 6,5% yaitu bernilai 17,19%.

5. *VFWA*

Void Filled With Asphalt (*VFWA*) merupakan rongga di antara butir agregat yang terisi oleh aspal. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar bagian dari rongga agregat yang telah diisi oleh aspal, sehingga dapat menilai kemampuan aspal dalam mengisi celah agregat. Hasil pengujian *VFWA* dapat dilihat melalui gambar 5.12 sebagai berikut.

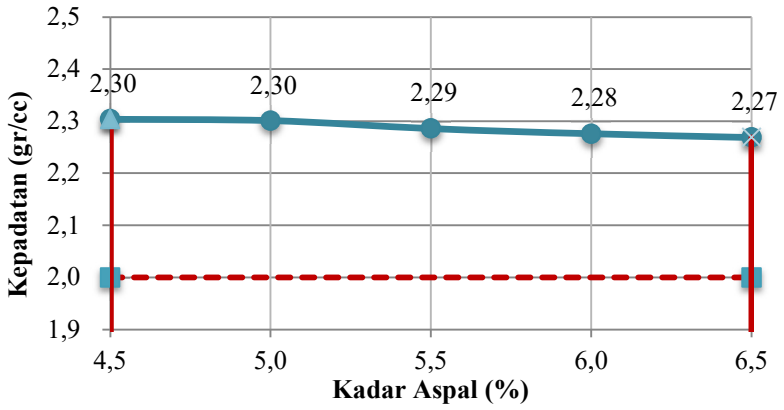


Gambar 5.12 Grafik Nilai *VFWA* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

Berdasarkan Gambar 5.20, nilai *VFWA* meningkat dari 65,05% pada kadar aspal 4,5% menjadi 77,53% pada kadar 6,5%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar aspal, semakin besar pula rongga yang terisi aspal. Sesuai dengan standar Bina Marga 2018 revisi 2, kadar aspal yang memenuhi yaitu kadar 4,5% hingga 6,5%, dengan kadar tertinggi berada pada kadar aspal 6,5%.

6. Densitas (*Density*)

Densitas adalah berat isi campuran beraspal padat setelah pemadatan. Tujuan dari pengujian adalah untuk mengetahui tingkat densitas total campuran. Hasil pengujian densitas dapat dilihat melalui gambar 5.13 berikut.



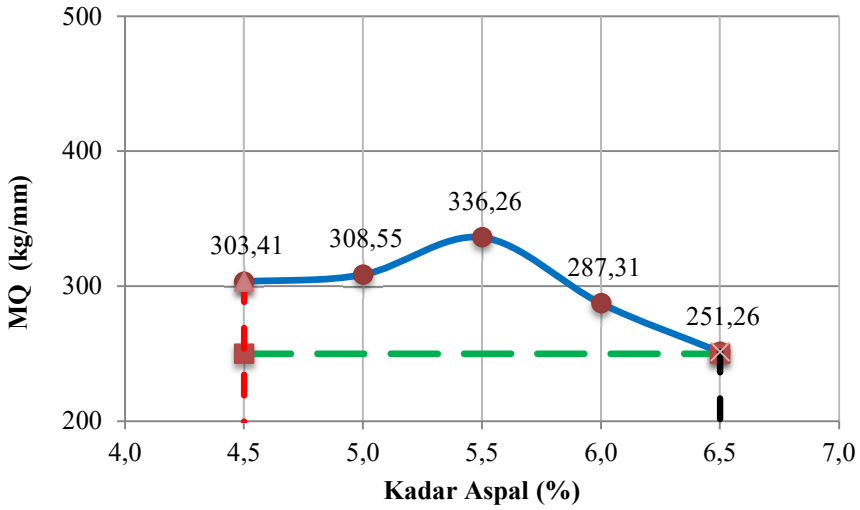
Gambar 5.13 Grafik Nilai Densitas KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

Berdasarkan Gambar 5.13, nilai density menunjukkan tren menurun dari 2,304 gr/cm³ pada kadar aspal 4,5% menjadi 2,269 gr/cm³ pada kadar 6,5%.

Penurunan ini disebabkan oleh bertambahnya kadar aspal yang membuat berat isi campuran berkurang. Nilai densitas tertinggi terdapat pada kadar aspal 4,5% sebesar 2,304 gr/cm³ dan mengalami penurunan secara bertahap hingga kadar aspal 6,5%.

7. Marshall Quotient (MQ)

MQ adalah perbandingan antara stabilitas dan *Flow*, Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkatan kaku dan ketahanan campuran terhadap deformasi. Hasil pengujian *MQ* dapat dilihat melalui gambar 5.14 berikut.



Gambar 5.14 Grafik Nilai *MQ* KAO *Superpave* Aspal Pen 60/70

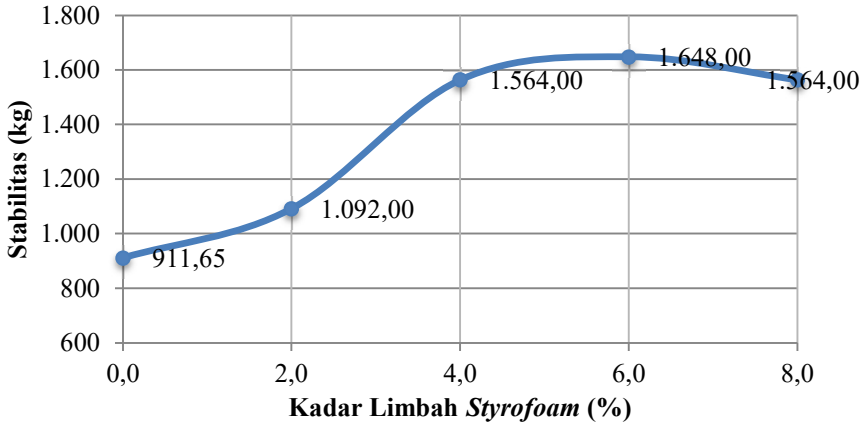
Berdasarkan Gambar 5.14, nilai *MQ* mengalami peningkatan dari 303,41 kg/mm pada kadar aspal 4,5% hingga mencapai nilai maksimum sebesar 336,26 kg/mm pada kadar 5,5%, kemudian menurun menjadi 251,26 kg/mm pada kadar 6,5%. Peningkatan nilai *MQ* sampai kadar 5,5% disebabkan oleh peningkatan stabilitas yang lebih besar dibandingkan peningkatan *Flow*. Setelah melewati kadar optimum, nilai *MQ* menurun karena penambahan aspal menyebabkan stabilitas menurun dan *Flow* meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa campuran paling kaku dan kuat terhadap deformasi terjadi pada kadar aspal 5,5%.

5.2.4 Karakteristik *Marshall* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam*

Pada Pengujian ini, hasil pengujian *MS* dapat memperlihatkan pengaruh penambahan kadar *Styrofoam* pada aspal pen 60/70 berdasarkan nilai hasil Stabilitas, *Flow*, *VITM*, *VMA*, *VFWA*, dan *MQ* untuk campuran *Superpave* sebagai berikut.

1. Stabilitas (*Stability)*

Stabilitas merupakan kemampuan suatu lapisan perkerasan untuk mempertahankan bentuk dan fungsinya ketika menerima beban lalu lintas, sehingga tidak terjadi perubahan bentuk permanen maupun kerusakan plastis selama proses pembebanan berlangsung. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5.15 Grafik Stabilitas Aspal

Berdasarkan grafik hubungan antara kadar limbah *Styrofoam* terhadap stabilitas campuran aspal, terlihat bahwa nilai stabilitas meningkat seiring dengan penambahan kadar *Styrofoam* hingga mencapai titik optimum pada kadar sekitar 6%. Setelah melewati kadar tersebut, nilai stabilitas mengalami sedikit penurunan. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas sampai pada kadar tertentu.

Nilai stabilitas pada kadar 0% yaitu 911,65 kg sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% meningkat menjadi 1.091,39 kg atau naik 19,78%, kadar 4%

meningkat menjadi 1.563,00 kg atau naik 71,56%, kadar 6% meningkat menjadi 1.648,00 kg atau naik 80,77%, dan kadar 8% memiliki nilai 1.563,00 kg menurun dibandingkan 6% sebesar 5,16 %. Dengan demikian, kadar 6% menunjukkan perubahan paling signifikan terhadap variabel kontrol

Kenaikan nilai stabilitas pada kadar awal hingga titik optimum disebabkan oleh sifat *Stytofoam* yang mampu bereaksi dengan cairan aspal membentuk ikatan di antara partikel aspal. Ikatan tersebut mempengaruhi penetrasi menjadi menurun, kemudian menyebabkan aspal lebih keras. Selain itu, daktilitas yang semakin menurun membuat aspal menjadi lebih kaku sehingga campuran lebih stabil pada kenaikan kada 0%-6%.

Pada kadar 8% stabilitas campuran cenderung menurun. Penurunan tersebut diakibatkan oleh kondisi aspal yang menjadi terlalu kaku dan tidak memiliki kelenturan sehingga campuran menjadi semakin cepat untuk mengalami kerusakan. Aspal yang memiliki daktilitas sangat rendah menyebabkan tingkat kelenturan rendah sehingga aspal tidak memiliki batas toleransi kehancuran. Akibatnya, campuran menjadi lebih rapuh dan mudah retak saat menerima tegangan tinggi. Pendapat ini, didukung oleh Yousif dkk. (2024) yang menyebutkan bahwa penurunan penetrasi dan daktilitas akibat penambahan polimer dengan kadar tertentu menyebabkan aspal menjadi lebih keras dan kaku. Dan apabila melakukan penambahan polimer dalam cairan aspal maka stabilitas akan menurun.

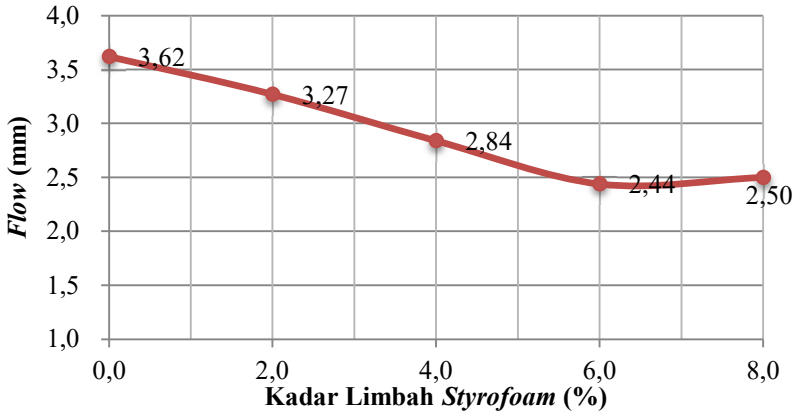
Pengaruh tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Rachman dkk (2021) yang menghasilkan penelitian dengan peningkatan kadar *Styrofoam* yang menghasilkan peningkatan stabilitas aspal hingga kadar *Styrofoam* optimum kemudian stabilitas tersebut akan menurun seiring dengan penambahan *Styrofoam*. Dan terakhir terdapat penelitian yang dilakukan Yousif dkk. (2024) yang menghasilkan peningkatan kadar stabilitas pada kadar tertentu.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kadar limbah *Styrofoam* optimum berada pada kisaran 6%, di mana keseimbangan antara sifat fleksibel dengan sifat kaku campuran. Nilai stabilitas pada kadar tersebut menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan campuran tanpa *Styrofoam* 0%, menandakan bahwa penambahan limbah *Styrofoam* mampu meningkatkan

performa struktural lapisan perkerasan aspal.

3. Kelelehan (*flow*)

Flow adalah ukuran deformasi yang terjadi pada material akibat beban hingga mencapai titik kegagalan, dinyatakan dalam satuan milimeter atau 0,01 inci. semakin tinggi nilai *flow* maka campuran aspal maka campuran maka tinggi kelenturan dan semakin rendah nilai *flow* maka semakin kaku campuran tersebut. Dalam pengujian ini, nilai kelelehan *flow* dapat dilihat pada Gambar 5.16 sebagai berikut.



Gambar 5.16 Grafik *Flow* Aspal

Berdasarkan hasil nilai yang diperoleh, nilai *flow* akan semakin menurun seiring bertambahnya kadar limbah *Styrofoam*. Nilai *flow* pada kadar 0% yaitu 3,62 mm sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% menurun menjadi 3,27 mm atau menurun 9,67%, kadar 4% menjadi 2,84 mm atau menurun 21,55%, kadar 6% sebesar 2,44 mm atau menurun 32,60%, dan kadar 8% menjadi 2,50 mm atau meningkat 2,46% dibanding kadar 6%. Berdasarkan hasil tersebut, kadar 6% memberikan perubahan paling signifikan.

Penurunan nilai *Flow* dengan kadar 0%-6% diakibatkan oleh adanya ikatan *Styrofoam* yang terserap bersama maltene aspal dan sebagian *Styrofoam* akan menyelimuti maltenes aspal sehingga gerakan maltenes lebih terbatas sehingga molekul aspal lebih padat dan kaku. Penurunan *flow* tersebut didukung oleh hasil daktilitas dan penetrasi aspal yang juga menurun. Penurunan ini mengindikasikan bahwa *flow* menurun akibat aspal mengalami deformasi yang lebih sedikit akibat

aspal yang lebih keras dan kaku. Namun pada kadar 8% *flow* Kembali meningkat akibat adanya aspal yang terlalu kaku namun ketika dicampur dengan agregat membuat aspal tidak dapat mengikat agregat karena *Styrofoam* dan Aspal membentuk gumpalan atau agregasi.

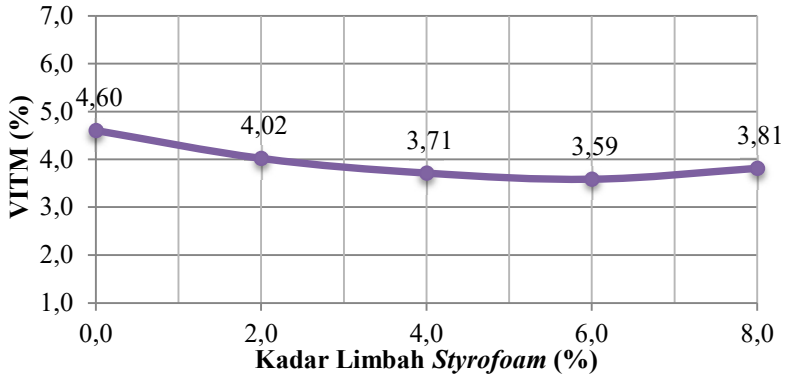
Argumen tersebut didukung oleh Behnood & Gharehveran (2018) yang menjelaskan Styrene Butadiene Styrene polymer yang masih berada dalam rentang optimum, partikel *Styrofoam* dapat terdispersi secara lebih merata pada fase malten aspal. Dispersi yang homogen ini memperkuat struktur ikatan dalam binder, sehingga campuran menjadi lebih kaku dan menunjukkan kemampuan deformasi yang lebih rendah, yang tercermin dari penurunan nilai *flow*. Namun, ketika kadar *SBS polymer* ditingkatkan melampaui titik optimum, sebagian polimer tidak lagi dapat terdispersi secara efektif di dalam fase aspal. Kondisi tersebut memicu terbentuknya agregasi atau kluster polimer bebas yang menyebabkan heterogenitas dalam campuran.

Temuan ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Tandiabang dkk. (2022) yang menghasilkan adanya penurunan pada kadar *flow*. Dan terdapat penelitian serupa yaitu Ibrahim dkk. (2012) yang menyebutkan bahwa peningkatan *Expanded Polystyrene* akan menyebabkan penurunan *flow*.

Berdasarkan grafik dan penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa penambahan kadar limbah *Styrofoam* dalam campuran aspal secara signifikan mengurangi nilai kelelehan. Hal ini menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih kaku dan tahan terhadap deformasi plastis. Nilai terendah berada pada kadar 4-6% namun masih sesuai dengan standar Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu >2.

4. *Void In Total Mix* (*VITM*)

VITM merupakan cara yang digunakan untuk menghitung persentase rongga udara yang tersisa dalam campuran beraspal padat, digunakan untuk menilai densitas dan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat udara dan air. Hasil *VITM* campuran *Superpave* aspal pen 60/70 dengan penambahan *Styrofoam* dapat dilihat pada Gambar 5.17 sebagai berikut.



Gambar 5.17 Grafik *VITM* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan pengujian ini, nilai *VITM* yang didapatkan nilai pada kadar 0% yaittu 4,6% , 2% yaitu 4,02%, 4% yaitu 3,71%, 6% yaitu 3,59% dan 8% yaitu 3,81%. Nilai *VITM* tersebut seluruhnya telah memenuhi Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu $3 \leq VITM \leq 5$. Terlihat penurunan terus terjadi seiring dengan pertambahan kadar *Styrofoam* hingga 6% kemudian cenderung memiliki sedikit peningkatan setelah kadar tersebut.

Nilai *VITM* pada kadar 0% adalah 4,60% sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% nilai *VITM* menurun menjadi 4,02% atau menurun 12,61%, pada kadar 4% menjadi 3,71% atau menurun 19,35%, kadar 6% sebesar 3,59% atau menurun 21,96%, dan kadar 8% sebesar 3,81% atau meningkat 5,77% dibanding kadar 6%. Berdasarkan data tersebut, kadar 6% menunjukkan perubahan paling signifikan terhadap variabel kontrol.

Hasil penurunan *VITM* 0% hingga 6% tersebut diakibatkan oleh limbah *Styrofoam* adalah bahan yang bersifat termoplastik, sehingga ketika dicampurkan ke aspal dengan suhu tinggi, *Styrofoam* akan menjadi cair dan membantu aspal untuk mengisi rongga-rongga dalam campuran sehingga membuat campuran lebih padat. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Selintung dkk. (2022) yang menyebutkan bahwa *Styrofoam* merupakan bahan termoplastik yang memiliki sifat ketika terkena suhu panas benda tersebut akan meleleh dan ketika dingin akan memadat. Peningkatan *VITM* pada kadar 8% disebabkan oleh kelebihan *Styrofoam*, sehingga tidak dapat terdispersi bersama maltene dan justru membentuk gumpalan kemudian memicu segregasi sehingga meningkatkan rongga pada ikatan

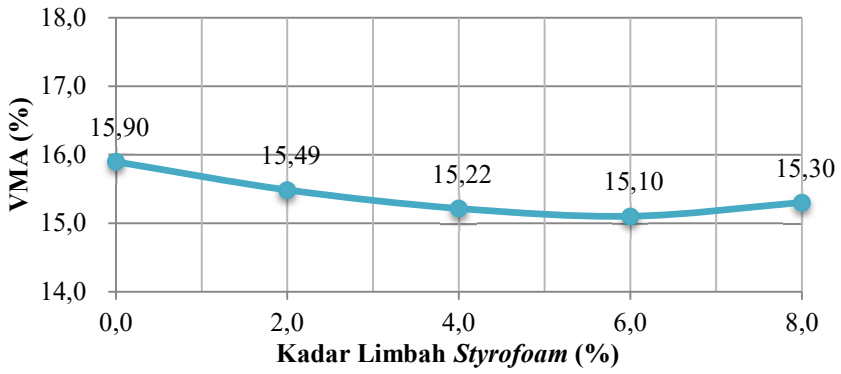
campuran.

Penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Murana dan Olowosulu (2020) yang melaporkan bahwa penambahan *Styrofoam* menyebabkan penurunan nilai *VITM* pada kadar tertentu, yang menunjukkan peningkatan densitas campuran dan pengurangan rongga udara. Penurunan *VITM* ini dapat diakibatkan oleh kemampuan *Styrofoam* untuk mengisi rongga antara partikel agregat.

Dengan demikian, kadar yang optimal digunakan untuk penambahan *Styrofoam* yaitu pada kadar 6%. Kadar tersebut membuat aspal lebih padat yang ditunjukkan dengan menurunnya rongga pada campuran total aspal dan selaras dengan hasil stabilitas pengujian ini yang meningkat pada kadar 6%. Dengan kadar tersebut, campuran aspal mencapai densitas maksimum dan stabilitas terbaik, sehingga memiliki performa yang optimal untuk digunakan sebagai lapisan permukaan jalan. Selain itu, pada kadar ini, potensi terjadinya rongga berlebih atau deformasi berlebihan dapat diminimalkan, sehingga kualitas campuran tetap terjaga.

5. *Voids in Mineral Aggregate* (*VMA*)

VMA adalah volume total rongga dalam campuran agregat, baik yang terisi maupun tidak oleh aspal, terhadap volume total agregat . Hasil *VMA* dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5.18 Grafik *VMA* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan hasil pengujian nilai *VMA* pada campuran aspal dengan penambahan limbah *Styrofoam*, diketahui bahwa nilai *VMA* tertinggi diperoleh pada campuran tanpa bahan tambahan, yaitu sebesar 4,60%. Selanjutnya, seiring

bertambahnya kadar *Styrofoam* dari 2% hingga 6%, nilai *VMA* menunjukkan kecenderungan menurun hingga mencapai titik terendah sebesar 3,59% pada kadar 6%. Namun, pada kadar *Styrofoam* 8%, nilai *VMA* kembali mengalami sedikit peningkatan menjadi 3,81%. Secara umum, variasi kadar *Styrofoam* dari 0% hingga 8% tetap menunjukkan nilai *VMA* yang berada dalam kisaran Spesifikasi Umum Bina Marga (2018) revisi 2, yaitu lebih dari 15%.

Nilai *VMA* pada kadar 0% sebesar 15,90% sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% menurun menjadi 15,49% atau menurun 2,58%, kadar 4% menjadi 15,22% atau menurun 4,28%, kadar 6% menjadi 15,10% atau menurun 5,03%, dan kadar 8% menjadi 15,30% atau meningkat 1,31% terhadap kadar 6%. Dengan demikian, kadar 6% memberikan perubahan paling signifikan.

Penyebab penurunan *VMA* hingga 6% pada campuran dapat disebabkan akibat *Styrofoam* yang terkena suhu tinggi menyebabkan *Styrofoam* tersebut mencair atau meleleh dan bercampur dengan aspal, sehingga mudah memasuki rongga antar agregat dan menyelimuti agregat yang belum tersentuh atau tercampur aspal. Dengan demikian *VMA* akan menurun dengan adanya peningkatan aspal dan *Styrofoam* yang masuk. Namun peningkatan pada kadar diatas 6% menyebabkan *VMA* meningkat dengan adanya penggumpalan (agregasi) aspal dengan *Styrofoam* sehingga aspal dan agregat menjadi mudah untuk segregasi.

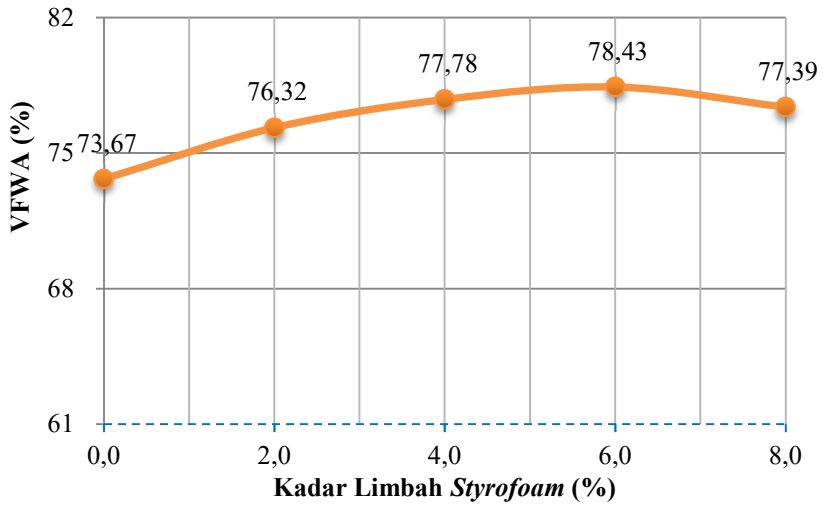
Hal tersebut sesuai dengan penjelasan Mayuni dkk.(2025) yang menjelaskan penurunan *VMA* terhadap kenaikan kadar *Styrofoam atau EPS* disebabkan oleh kelelehan atau pencairan *EPS* dengan suhu tinggi, sehingga membantu aspal untuk mengalir dan menyelimuti antar agregat. Penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wahiddin dkk.(2025) yang mencampurkan aspal dengan *Styrofoam.* Hasil tersebut menunjukan bahwa pencampuran zat aditif (*Styrofoam*) membuat campuran aspal memiliki *VMA* yang semakin menurun.

Dengan demikian, pada pengujian ini dapat disimpulkan persentase *VMA* yang yang optimal dalam pencampuran aspal yaitu berada pada kadar *Styrofoam* 6%. Hal tersebut disebabkan oleh semakin rendah kadar *VMA* akan membuat campuran aspal lebih padat dan rongga antar agregat menjadi lebih sedikit, serta

memperkuat lekatan aspal dengan agregat. Hal tersebut menyebabkan campuran aspal lebih stabil untuk menerima beban lalu lintas.

6. *Void Filled With Asphalt (VFWA)*

VFWA atau rongga yang terisi aspal merupakan parameter yang menunjukkan volume rongga dalam agregat mineral *VMA* yang terisi oleh aspal efektif dalam suatu campuran beraspal. Parameter ini bertujuan untuk ini yaitu digunakan untuk mengetahui kemampuan aspal dalam mengisi rongga dalam campuran. Hasil *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.



Gambar 5.19 Grafik *VFWA* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa nilai *VFWA* mengalami peningkatan pada setiap penambahan kadar limbah *Styrofoam* hingga mencapai 6%, kemudian cenderung menurun pada penambahan kadar 8%. Pola tersebut menunjukkan bahwa pada kadar tertentu, yaitu sekitar 6%, pengisian rongga oleh aspal berada pada titik optimum. Jika dibandingkan dengan spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu melebihi 65%.

Nilai *VFWA* awal pada kadar 0% adalah 73,67% sebagai variabel kontrol. Pada kadar *Styrofoam* 2% meningkat menjadi 76,31% atau naik 3,60%, kadar 4% menjadi 77,79% atau naik 5,58%, kadar 6% sebesar 78,43% atau naik 6,46%, dan kadar 8% menjadi 77,40% atau menurun 1,32% dibanding kadar 6%. Kadar 6%

menunjukkan perubahan paling signifikan terhadap variabel kontrol.

Kecenderungan peningkatan nilai *VFWA* tersebut terjadi karena limbah *Styrofoam* memiliki sifat termoplastik, yaitu mudah melunak dan berubah bentuk saat mendapatkan suhu tinggi pada proses pencampuran aspal. Dalam kondisi panas, sebagian *Styrofoam* akan meleleh dan bercampur dengan aspal, kemudian membentuk lapisan tipis yang menempel pada permukaan agregat. Sifat *Styrofoam* yang ringan serta memiliki tekstur halus membuat penyebaran aspal di antara butiran agregat menjadi lebih merata. Hal ini menyebabkan rongga antarbutir agregat dapat terisi lebih sempurna oleh aspal. Dengan terisinya rongga secara optimal, campuran menjadi lebih padat dan nilai *VFWA* meningkat hingga mencapai kadar tertentu. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada batas kadar tertentu, interaksi antara *Styrofoam* dan aspal masih berjalan stabil dan mampu memperbaiki kerapatan internal pada campuran beraspal. Namun setelah melewati kadar optimum, efek ini tidak lagi berlanjut. Pada konsentrasi tinggi, sebagian *Styrofoam* tidak dapat terdispersi dengan baik dan mulai berkumpul membentuk gumpalan. Ketika struktur internal campuran mengalami pemadatan, gumpalan *Styrofoam* yang tidak larut tersebut justru menghalangi aspal memasuki sebagian rongga.

Fenomena tersebut didukung oleh hasil penelitian Paembonan, Alpius, dan Kamba (2022) yang meneliti campuran AC-WC dengan penambahan *Styrofoam* bekas. Mereka melaporkan bahwa nilai *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*) meningkat hingga kadar *Styrofoam* 4–6% dan menurun setelahnya. Peneliti menjelaskan bahwa pada kadar rendah hingga sedang, *Styrofoam* membantu meningkatkan penyebaran aspal dan memperbaiki daya lekat antar-agregat, sedangkan pada kadar berlebih campuran menjadi tidak homogen dan mengurangi kemampuan aspal dalam mengisi rongga antar-agregat.

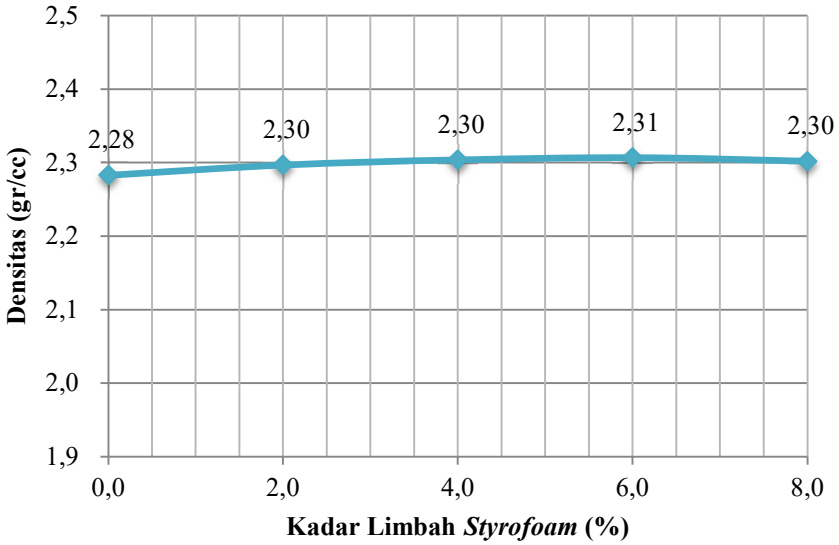
Hal tersebut sejalan dengan temuan Olowosulu dan Murana (2020), yang melaporkan bahwa nilai *VFWA* pada campuran aspal termodifikasi *Expanded Polystyrene* (*EPS*) mengalami peningkatan hingga kadar tertentu, kemudian menurun pada kadar yang lebih tinggi. Peneliti menjelaskan bahwa pada kadar rendah hingga sedang, *EPS* membantu memperbaiki penyelimutan agregat oleh

aspal dan meningkatkan ikatan antar-butir, sehingga volume rongga yang terisi aspal bertambah. Namun, pada kadar *EPS* yang berlebih, distribusi binder menjadi tidak merata akibat pelapisan agregat yang tidak sempurna dan terbentuknya rongga udara, yang akhirnya menurunkan nilai *VFWA*. Tren ini menggambarkan bahwa terdapat batas optimum kadar polimer di mana kemampuan aspal untuk mengisi rongga masih efisien sebelum struktur campuran menjadi terlalu kaku dan tidak homogen.

Dengan demikian, penggunaan kadar limbah *Styrofoam* yang dapat menghasilkan nilai *VFWA* paling optimum ada pada kadar 6%. Peningkatan nilai *Flow* pada kadar 6% menunjukkan bahwa pada kadar tersebut, interaksi antara *Styrofoam* dan aspal berada pada kondisi paling seimbang. Aspal masih mampu menyelimuti agregat secara merata tanpa menyebabkan campuran menjadi terlalu kaku maupun terlalu lembek. Kondisi ini mencerminkan bahwa pengisian rongga oleh aspal berlangsung secara efisien, sehingga menghasilkan campuran yang padat, stabil, dan tetap memenuhi kriteria volumetrik sesuai spesifikasi Bina Marga (2018).

7. Densitas (*Density*)

Densitas merupakan ukuran berat campuran per satuan volume (gr/cc) yang mencerminkan tingkat kerapatan butiran agregat dan aspal di dalam campuran. Nilai densitas yang tinggi menandakan bahwa rongga udara dalam campuran semakin sedikit, sehingga struktur campuran menjadi lebih padat dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban lalu lintas serta terhadap masuknya udara dan air. Hal ini penting karena campuran yang padat dapat mengurangi risiko oksidasi aspal dan memperpanjang umur perkerasan. Hasil Densitas dapat dilihat pada Gambar 5.20 berikut ini.



Gambar 5.20 Grafik Densitas Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan data hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.20, nilai densitas campuran mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar limbah *Styrofoam* dari 0% hingga 6%. Nilai densitas berturut-turut adalah 2,283 gr/cc pada kadar aspal 0%, 2,297 gr/cc pada kadar 2%, 2,304 gr/cc pada kadar 4%, dan mencapai nilai maksimum sebesar 2,307 gr/cc pada kadar aspal 6%. Namun, pada kadar aspal 8% terjadi sedikit penurunan menjadi 2,302 gr/cc. Seluruh densitas pada kadar *Styrofoam* tersebut telah sesuai dengan standar Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu lebih dari atau sama dengan 2,00 gr/cc.

Pada kadar 0%, nilai density adalah 2,28 g/cm³ sebagai kontrol. Pada kadar 2% dan 4%, density meningkat menjadi 2,30 g/cm³ atau naik 0,88%, menunjukkan peningkatan kecil akibat berkurangnya rongga mikro pada campuran. Pada kadar 6%, density mencapai nilai tertinggi yaitu 2,31 g/cm³ dengan peningkatan 1,32%, sehingga menjadi kadar dengan perubahan paling besar. Pada kadar 8%, density kembali ke 2,30 g/cm³ dengan peningkatan 0,88%.

Kecenderungan peningkatan densitas hingga kadar 6% menunjukkan bahwa penambahan aspal mampu mengisi rongga antarbutir agregat dengan lebih baik, sehingga campuran menjadi lebih rapat. Hal ini terindikasi melalui menurunnya kadar *VITM* dan *VMA* yang diakibatkan oleh aspal secara optimal hingga titik

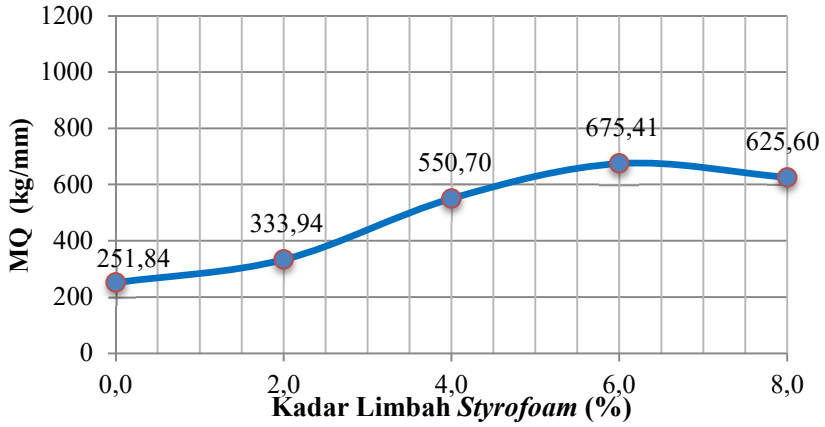
tertentu, sebelum akhirnya cenderung menurun karena kelebihan aspal pada kadar tinggi (8%) justru menurunkan nilai densitas akibat terjadinya pelapisan berlebih (*excess binder*). Kondisi tersebut dapat menyebabkan butiran agregat kehilangan kontak langsung antarpartikel sehingga struktur campuran menjadi kurang padat.

Pengaruh tersebut sesuai dengan journal milik Yousif dkk. (2024) yang melakukan penelitian terkait penambahan polimer dengan menghasilkan hubungan antara penambahan kadar *polyesterene* dengan densitas, yaitu dengan penambahan kadar dengan persentase tertentu maka densitas akan semakin meningkat dan seiring dengan peningkatan densitas diikuti oleh *VITM* dan *VMA* yang menurun. Namun, nilai densitas akan kembali menurun karena dengan penambahan kadar polimer melebihi kadar optimum akan menyebabkan polimer mengalami segregasi dengan aspal sehingga mengurangi densitas.

Dengan demikian, kadar penambahan limbah *Styrofoam* sebesar 6% dapat dikategorikan sebagai titik optimum, karena pada kadar tersebut campuran menunjukkan tingkat densitas yang paling seimbang. Walaupun kenaikan densitas tidak terlalu signifikan, Nilai densitas yang meningkat mencerminkan struktur agregat yang tersusun lebih rapat dan lapisan aspal yang menyelimuti butiran agregat secara merata. Kondisi tersebut memperkuat kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas dan menjaga stabilitas lapisan perkerasan, sekaligus tetap mempertahankan kelenturan yang diperlukan agar tidak mudah mengalami retak atau deformasi.

8. *Marshall Quotient* (*MQ*)

MQ merupakan menggambarkan keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan campuran. semakin tinggi nilainya, campuran cenderung lebih kaku dan kuat, sedangkan nilai yang terlalu rendah menunjukkan campuran lebih plastis dan mudah berubah bentuk. Berdasarkan penelitian ini terdapat hasil *MQ* yang dapat dilihat pada Gambar 5.21 berikut.



Gambar 5.21 Grafik *MQ* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan Gambar 5.21 dapat diketahui bahwa dengan adanya penambahan limbah *Styrofoam* berhubungan dengan kenaikan nilai stabilitas dan menurunkan *Flow* sehingga perbandingan antara keduanya semakin jauh dan nilai yang ada pada *MQ* dapat meningkat. Peningkatan tersebut terjadi pada kadar 0% hingga 6% kemudian kembali turun saat kadar melebihi 6%. Seluruh nilai *MQ* pada kadar 0% hingga 8% masih memenuhi nilai yang ada pada Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu minimal 200 kg/mm.

Nilai *MQ* pada kadar 0% yaitu 251,84 kg/mm sebagai variabel kontrol. Pada kadar 2% meningkat menjadi 334,01 kg/mm atau naik 32,60%, kadar 4% menjadi 551,38 kg/mm atau naik 118,67%, kadar 6% sebesar 675,41 kg/mm atau naik 168,19%, dan kadar 8% sebesar 625,33 kg/mm atau menurun 7,41% terhadap kadar 6%. Berdasarkan data tersebut, kadar 6% merupakan kadar paling signifikan terhadap peningkatan nilai *MQ*.

Peningkatan *MQ* tersebut diakibatkan oleh nilai stabilitas yang meningkat hingga kadar tertentu kemudian nilai *flow* yang menurun. Stabilitas dan *flow* sangat dipengaruhi oleh film aspal yang menebal yang menyebabkan peningkatan nilai stabilitas, namun hal tersebut menyebabkan kaku pada campuran, sehingga akan menurunkan nilai *flow* yang menyebabkan campuran tersebut semakin kaku. Hal tersebut dapat dibuktikan melalui nilai penetrasi dan daktilitas aspal. Ketika kadar *Styrofoam* melebihi titik optimum, film aspal terlalu tebal sehingga distribusi binder menjadi kurang merata, menyebabkan kontak antar-butir agregat terganggu,

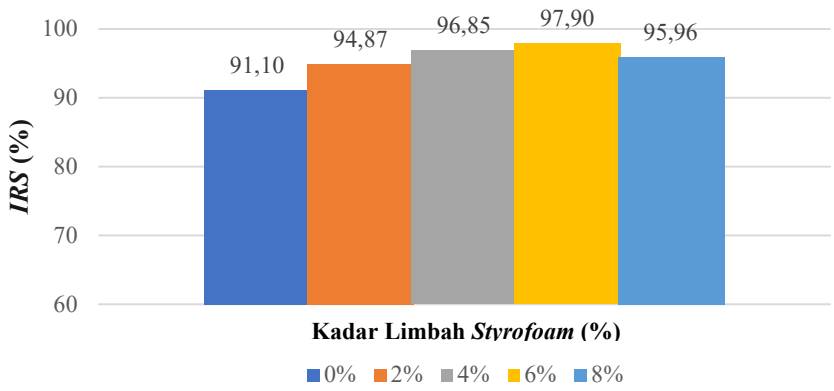
stabilitas menurun, dan *flow* mulai meningkat kembali, sehingga *MQ* kembali menurun.

Penelitian tersebut sesuai dengan hasil milik Ibrahim dkk. (2012) yang menyatakan bahwa yang menghasilkan penelitian penambahan *polyesterene*e dalam aspal. Hasil tersebut menyebabkan peningkatan stabilitas aspal yang semakin meningkat namun *flow* aspal yang semakin menurun. Hal tersebut disebabkan oleh adanya peningkatan penebalan lapisan film aspal sehingga aspal menjadi lebih stabil dan kaku. Selain itu menurut Alpius dkk. (2022) penambahan *Styrofoam* diperbanyak maka yang terjadi yaitu film aspal menjadi terlalu tebal yang justru akan membuat *Flow* bertambah meningkat dan durabilitas menurun.

Dengan demikian nilai penambahan limbah *Styrofoam* yang baik sesuai dengan hasil *MQ* yaitu pada kadar 6%. Pemilihan kadar tersebut sesuai dengan hasil parameter optimal yang memiliki perbandingan antara stabilitas dan *flow* yang tertinggi. sehingga aspal dapat menahan beban dengan lebih efektif ke arah dengan deformasi minimum. Penebalan film aspal menghasilkan better aggregate–binder bonding dan campuran menjadi lebih kaku, namun saat kadar *Styrofoam* melewati titik optimum maka distribusi binder menjadi kurang merata, mengganggu kontak antar-butir agregat dan mulai meningkatkan deformasi (*flow*) kembali.

5.2.5 Karakteristik *IRS* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam*

Index of Retained Strength (*IRS*) merupakan parameter yang digunakan untuk menilai kemampuan campuran beraspal dalam mempertahankan kekuatannya setelah mengalami perendaman dalam air pada suhu tertentu. Tujuan uji ini adalah mengetahui seberapa besar kekuatan stabilitas campuran beraspal yang masih tersisa setelah direndam dalam air panas selama 24 jam pada suhu 60 °C, sedangkan sampel pembanding direndam 0,5 jam. Nilai *IRS* menggambarkan seberapa besar penurunan kekuatan melalui perbandingan yang dialami campuran akibat efek suhu dan perendaman air, yang biasanya dihubungkan dengan durabilitas campuran. Adapun hasil pengujian *IRS*, dapat dilihat nilai pada Gambar 5.22 berikut ini .



Gambar 5.22 Grafik *IRS* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan hasil penelitian yang dilaksanakan, diketahui bahwa nilai *IRS* mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kadar limbah *Styrofoam* hingga kadar 6%, kemudian menunjukkan sedikit penurunan pada kadar 8%. Nilai *IRS* pada kadar 0% sebesar 91,10%, meningkat mencapai nilai tertinggi sebesar 97,90% pada kadar 6% *Styrofoam*. Namun demikian, pada kadar 8%, nilai *IRS* mengalami sedikit penurunan menjadi 95,96%, meskipun masih berada di atas batas minimum yang disyaratkan oleh standar Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu 90%. Berdasarkan analisis signifikansi terhadap nilai *IRS*, kadar 6% menunjukkan peningkatan tertinggi sebesar 7,46% dibanding kadar kontrol. Kadar 2%, 4%, dan 8% masing-masing meningkat 4,14%, 6,31%, dan 5,33%, sehingga meskipun seluruh kadar menunjukkan tren peningkatan, nilai dominan tetap berada pada kadar 6%.

Peningkatan *IRS* ini dapat dikaitkan dengan perubahan sifat fisik campuran setelah penambahan *Styrofoam*. *Styrofoam* memiliki sifat hidrofobik sehingga membantu mengurangi peluang air masuk ke dalam rongga campuran. Kondisi ini membuat adhesi antara aspal dan agregat tetap terjaga selama perendaman, sehingga kehilangan kekuatan campuran menjadi lebih kecil. Selain itu, nilai PI juga meningkat seiring penambahan *Styrofoam*. PI yang lebih tinggi menunjukkan bahwa aspal menjadi lebih stabil secara termal; aspal yang tidak mudah melunak saat terkena temperatur tinggi cenderung memiliki adhesi yang lebih kuat sehingga *IRS* ikut meningkat.

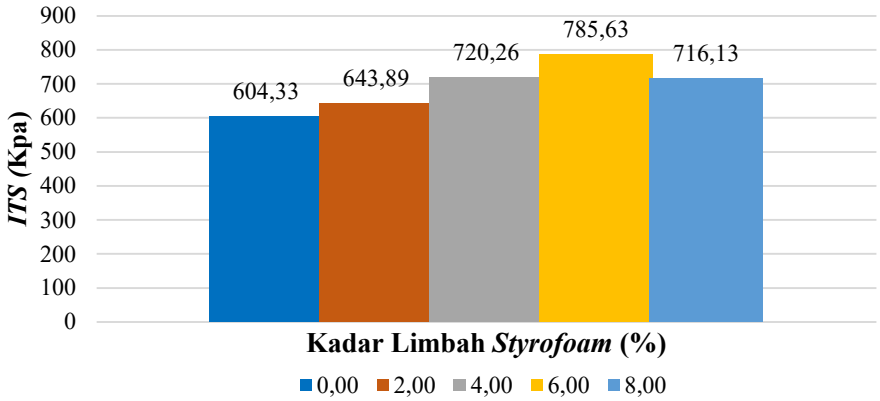
Hal tersebut sesuai dengan tren yang ditunjukkan oleh beberapa penelitian terdahulu. Menurut Yousif dkk. (2024), campuran aspal yang dimodifikasi bahan

polimer memperlihatkan peningkatan kinerja terhadap pengaruh air, dan tren tersebut serupa dengan peningkatan *IRS* yang diperoleh pada penelitian ini. Menurut Oparaeli dkk. (2018), campuran aspal yang ditambahkan *polystyrene* menunjukkan nilai *IRS* yang lebih tinggi dibandingkan campuran tanpa modifikasi, sehingga pola peningkatan *IRS* akibat penambahan bahan polimer juga terlihat pada penelitian ini. Selain itu, Nassar dkk. (2012) menampilkan data bahwa penambahan polystyrene menyebabkan perubahan pada sifat aspal melalui penurunan nilai penetrasi dan peningkatan titik lembek, yang merupakan tren serupa dengan peningkatan PI pada penelitian ini.

Dengan demikian, penambahan *Styrofoam* yang optimal dalam mempertahankan stabilitas campuran akibat kelembapan dan deformasi akibat air yaitu berada pada kadar 6%. Penentuan kadar tersebut berdasarkan perbandingan antara perendaman stabilitas durasi perendaman pada *waterbath* 0,5 jam dengan durasi perendaman pada *waterbath* 24 jam yang menghasilkan persentase sebesar 97,90%. Hal tersebut menandakan stabilitas yang berkurang dengan perendaman selama 24 jam tersebut berkurang sebesar 2,1% dibandingkan dengan kadar 0% penambahan *Styrofoam* yang memiliki kehilangan stabilitas akibat perendaman sebesar 8,9%. Maka dapat disimpulkan bahwa pada kadar 6% mampu menjaga stabilitas campuran dengan baik dibandingkan kadar yang lain.

5.2.6 Karakteristik *ITS* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam*

Indirect Tensile Strength (*ITS*) adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu bahan untuk menahan gaya tarik secara tidak langsung. Secara akademis, *ITS* mengukur kekuatan suatu material dalam menahan beban tarik yang bekerja secara longitudinal melalui gaya yang diterapkan secara horisontal pada sampel yang berbentuk silinder. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk memperoleh indikasi kekuatan bahan dalam menahan gaya tarik pada campuran aspal. Adapun Hasil pengujian *ITS* dapat dilihat melalui Gambar 5.23 berikut ini.



Gambar 5.23 Grafik *ITS* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan hasil tersebut, persentase *ITS* meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya kadar limbah *Styrofoam* dari 0% sebesar 604,33 kPa hingga mencapai puncaknya pada kadar 6% yaitu 785,63 kPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* dalam campuran dapat meningkatkan ketahanan tarik campuran tersebut sampai batas tertentu. Namun, ketika kadar *Styrofoam* ditingkatkan lebih lanjut menjadi 8%, nilai *ITS* mengalami penurunan menjadi 716,13 kPa. Pada parameter *ITS*, kadar 6% menunjukkan peningkatan paling signifikan sebesar 30,06% terhadap nilai kontrol. Kadar 2%, 4%, dan 8% masing-masing meningkat 6,55%, 19,17%, dan 18,49%. Hal ini menunjukkan bahwa kadar 6% merupakan kadar paling optimal dalam meningkatkan ketahanan tarik campuran.

Peningkatan disebabkan oleh *Styrofoam* yang tercampur ke dalam aspal panas membentuk ikatan polimer dengan fraksi ringan aspal, sehingga meningkatkan adhesi dan kohesi antara aspal dengan agregat. *Styrofoam*, sebagai polimer termoplastik, akan melebur pada suhu tinggi dan menyatu bersama aspal, sehingga membentuk ikatan yang memperkuat daya rekat antar partikel agregat dan aspal. Dengan adanya peningkatan adhesi ini, aspal mampu mengikat agregat secara lebih optimal dan kohesi antar partikel dalam campuran menjadi lebih baik, yang pada akhirnya mencegah terjadinya pemisahan butiran dan retak akibat gaya tarik.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Yousif dkk (2024) yang menerangkan bahwa peningkatan nilai *ITS* berhubungan peningkatan daya lekat pada aspal yaitu kohesi dan adhesi dengan agregat yang semakin meningkat

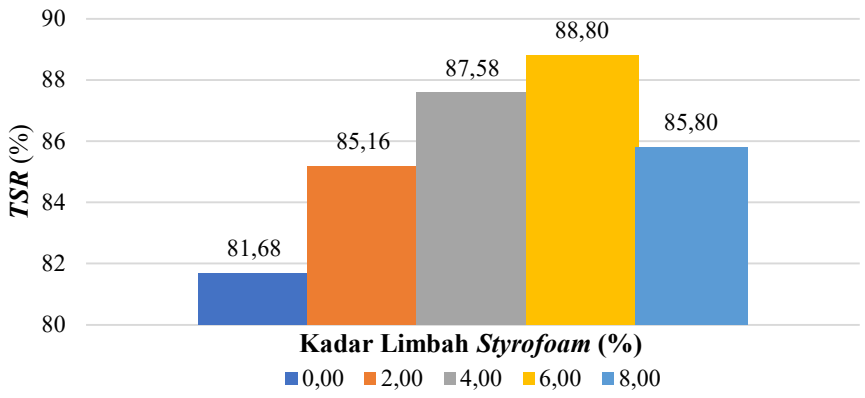
akibat penambahan *Styrofoam*. Sehingga campuran tersebut lebih tahan terhadap tegangan tarik dan deformasi permanan.

Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa kadar *Styrofoam* sebesar 6% merupakan komposisi yang paling optimal dalam meningkatkan nilai *ITS*. Pada kadar ini, keseimbangan antara adhesi dan kohesi dalam campuran berada pada kondisi terbaik, sehingga campuran aspal mampu menahan gaya tarik dan performa struktural yang maksimal. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penambahan *Styrofoam* pada kadar optimum dapat secara efektif memperbaiki karakteristik mekanik campuran aspal.

5.2.7 Karakteristik *TSR* Campuran *Superpave* Aspal Pen 60/70 Penambahan *Styrofoam*

Tensile Strength Ratio (*TSR*) merupakan parameter yang digunakan untuk menilai ketahanan campuran beraspal terhadap kerusakan akibat pengaruh air (*moisture damage*). Nilai *TSR* diperoleh dari perbandingan antara kekuatan tarik antara perendaman *waterbath* 0,5 jam dengan perendaman pada *waterbath* 24 jam. Nilai *TSR* menggambarkan sejauh mana kemampuan campuran aspal dalam mempertahankan kekuatan tariknya setelah mengalami perendaman, yang mensimulasikan kondisi lapangan ketika perkerasan terpapar air hujan, genangan, atau kelembapan jangka panjang.

Untuk mengetahui hasil pengujian *TSR* dapat dilihat pada gambar 5.24 berikut ini.



Gambar 5.24 Grafik *TSR* Aspal *Styrofoam*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada grafik di atas, nilai *TSR*

mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar limbah *Styrofoam* dalam campuran aspal. Pada kadar 0%, nilai *TSR* tercatat sebesar 81,68%, kemudian meningkat menjadi 85,16% pada kadar 2%, dan terus naik hingga mencapai 87,58% pada kadar 4%. Peningkatan tertinggi terjadi pada kadar 6%, yaitu sebesar 88,80%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* hingga kadar tersebut mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air *moisture damage*. Namun, ketika kadar *Styrofoam* dinaikkan menjadi 8%, nilai *TSR* mengalami sedikit penurunan menjadi 85,80%. Pada parameter *TSR*, kadar 6% memberikan peningkatan tertinggi sebesar 8,72% dibanding kadar kontrol. Kadar 2%, 4%, dan 8% juga mengalami peningkatan sebesar 4,27%, 7,22%, dan 5,03%, namun tidak sebesar kadar 6%.

Peningkatan nilai *TSR* hingga kadar 6% mengindikasikan bahwa *Styrofoam* berperan dalam memperbaiki ikatan antara aspal dan agregat melalui peningkatan kohesi serta adhesi yang lebih baik setelah perendaman. *Styrofoam*, yang bersifat termoplastik, mampu melebur dan membentuk lapisan pelindung di sekitar agregat, sehingga mengurangi kemungkinan penetrasi air ke dalam rongga campuran. Dengan demikian, campuran menjadi lebih tahan terhadap kerusakan akibat kelembapan dan kehilangan kekuatan tarik setelah terpapar air.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Yousif dkk. (2024) yang menjelaskan bahwa penambahan *Styrofoam* dapat meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap efek perendaman melalui peningkatan daya lekat antarpartikel dan perbaikan struktur internal campuran. Dengan meningkatnya nilai *TSR*, dapat disimpulkan bahwa campuran aspal memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan kekuatannya meskipun berada dalam kondisi basah.

Dari hasil pengujian tersebut, kadar limbah *Styrofoam* sebesar 6% dapat dikatakan sebagai komposisi yang paling optimal dalam meningkatkan nilai *TSR*. Pada kadar ini, campuran menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan adhesi dan ketahanan terhadap pengaruh air, sehingga menghasilkan performa yang stabil dan durabilitas yang tinggi pada perkerasan aspal.

5.2.8 Rekapitulasi Perbandingan Hasil Pengujian Karakteristik Keseluruhan Penambahan Kadar *Styrofoam*

Berikut merupakan hasil rekapitulasi pada seluruh parameter dalam penambahan kadar limbah *Styrofoam* pada aspal pen 60/70 campuran *Superpave*. Berikut merupakan rekapitulasi yang dapat dilihat pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Pengaruh Berbagai Kadar Limbah *Styrofoam* Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Aspal Pen 60/70

Kadar *Styrofoam* (%)	Pemenuhan Setiap Parameter					
	Penetrasi	Daktilitas	Titik Nyala	Titik Bakar	Titik Leleh	Berat jenis
0	√	√	√	√	√	√
2	√	√	√	√	√	√
4	√	√	√	√	√	√
6	√	√	√	√	√	√
8	×	×	√	√	√	√

Keterangan :
√ = Memenuhi Spesifikasi
× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 5.15, diketahui bahwa pada kadar *Styrofoam* sebesar 8% masih terdapat beberapa parameter yang tidak memenuhi ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* secara berlebihan dapat memengaruhi keseimbangan karakteristik campuran aspal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kadar limbah *Styrofoam* yang memenuhi seluruh persyaratan dan menghasilkan kinerja campuran terbaik berada pada rentang 0% hingga 6%, di

mana seluruh parameter pengujian telah sesuai dengan standar yang ditetapkan. Berikut merupakan rekapitulasi yang dapat dilihat pada Tabel 5.16.

Tabel 5.16 Pengaruh Berbagai Kadar Limbah *Styrofoam* Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik *Marshall Standard*(*MS*) pada Campuran Aspal Pen 60/70 *Superpave*

Kadar *Styrofoam* (%)	**Pemenuhan Setiap Parameter**						
	Stabilitas	***Flow***	***VITM***	***VMA***	***VFWA***	**Density**	***MQ***
0	√	√	√	√	√	√	√
2	√	√	√	√	√	√	√
4	√	√	√	√	√	√	√
6	√	√	√	√	√	√	√
8	√	√	√	√	√	√	√

Keterangan :

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Berdasarkan data pada Tabel 5.16, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh parameter utama campuran secara umum masih memenuhi batas ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018. Hal ini menandakan bahwa penambahan limbah *Styrofoam* pada variasi kadar yang digunakan, termasuk pada kadar tertinggi 8%, masih dapat diterapkan pada jenis campuran *Superpave* tanpa menyebabkan penyimpangan signifikan terhadap kinerja keseluruhan campuran.

Meskipun pada kadar 8% terdapat beberapa parameter properties aspal yang menunjukkan nilai di luar rentang ideal, namun karakteristik *Marshall* seperti stabilitas, *flow*, dan *MQ* masih berada dalam batas yang dipersyaratkan. Kondisi ini

menunjukkan bahwa perubahan sifat dasar aspal akibat penambahan *Styrofoam* tidak serta-merta menurunkan performa mekanik campuran. Dengan kata lain, modifikasi aspal menggunakan *Styrofoam* tetap mampu menghasilkan campuran yang memenuhi standar kinerja struktural, meskipun terjadi pergeseran sifat fisik binder pada kadar tinggi. Berikut merupakan rekapitulasi yang dapat dilihat pada Tabel 5.17.

Tabel 5.17 Pengaruh Berbagai Kadar Limbah *Styrofoam* Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik *IRS, ITS* dan *TSR* pada Campuran Aspal Pen 60/70 *Superpave*

Kadar *Styrofoam* (%)	**Pemenuhan Setiap Parameter**		
	IRS	***ITS***	***TSR***
0	√	√	√
2	√	√	√
4	√	√	√
6	√	√	√
8	√	√	√

Keterangan :
√ = Memenuhi Spesifikasi
× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Berdasarkan data pada Tabel 5.15, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh parameter utama campuran secara umum masih memenuhi batas ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018. Hal ini menandakan bahwa penambahan limbah *Styrofoam* pada variasi kadar yang digunakan, termasuk pada kadar tertinggi 8%, masih dapat diterapkan pada jenis campuran *Superpave* tanpa menyebabkan penyimpangan signifikan terhadap

kinerja keseluruhan campuran.

Meskipun pada kadar 8% terdapat beberapa parameter properties aspal yang menunjukkan nilai di luar rentang ideal, namun karakteristik *IRS*, *ITS*, dan *TSR* masih berada dalam batas yang dipersyaratkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan sifat dasar aspal akibat penambahan *Styrofoam* tidak serta-merta menurunkan performa mekanik campuran. Dengan kata lain, modifikasi aspal menggunakan *Styrofoam* tetap mampu menghasilkan campuran yang memenuhi standar kinerja struktural, meskipun terjadi pergeseran sifat fisik binder pada kadar tinggi.

Tabel 5.18 Perbandingan Nilai Propertis Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
1	Penetrasi	63,6	62,3	61,8	61,2	58,9	Penetrasi aspal menampakkan penurunan sebesar 7,4% dari kadar *Styrofoam* 0% ke 8%. Kondisi ini mencerminkan bahwa penambahan *Styrofoam* semakin meningkatkan kekerasan aspal.
2	Daktilitas	150	110	104,5	100,5	96	Daktilitas menunjukkan penurunan sebesar 36% pada kadar 8%, memberikan indikasi berkurangnya elastisitas campuran dan kecenderungan material menjadi lebih rapuh dengan presentasi *Styrofoam* tinggi.
3	Titik Nyala	332	345	348	350	353	Titik nyala bertambah hingga 6,3% pada kadar 8% membuktikan bahwa modifikasi dengan *Styrofoam* dapat

Lanjutan Tabel 5.18 Perbandingan Nilai Propertis Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
							memberikan efek positif terhadap kestabilan termal aspal pada aplikasi yang membutuhkan ketahanan temperatur tinggi.
4	Titik Bakar	339	350	352	355	358	titik bakar naik 5,6% pada kadar 8% membuktikan bahwa modifikasi dengan *Styrofoam* dapat memberikan efek positif terhadap kestabilan termal aspal pada aplikasi yang membutuhkan ketahanan temperatur tinggi.
5	Titik Lembek	49	49,5	50,5	51	52,5	Titik lembek mengalami peningkatan sebanyak 7,1% pada 8%.Hal ini menandakan daya tahan terhadap deformasi termal turut terangkat seiring proporsi *Styrofoam*.
6	Berat jenis	1,025	1,078	1,119	1,137	1,178	Berat jenis campuran menunjukan pertumbuhan hingga 14,95% pada 8%, mengimplikasikan bahwa penambahan *Styrofoam* turut memengaruhi densitas material secara signifikan.

Lanjutan Tabel 5.18 Perbandingan Nilai Propertis Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
							secara lebih merata
6	*Penetration Index* (PI)	-0,89	-0,81	-0,57	-0,47	-0,20	Signifikansi pada kadar 8% dibandingkan 0% menunjukkan peningkatan PI sekitar 77,5%, akibat aspal jadi lebih keras dan kepekaan terhadap suhu rendah.

Tabel 5.19 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter *Volumetrik*

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
1	*VITM*	4,60	4,02	3,71	3,59	3,81	Nilai *VITM* yang terjadi adalah penurunan nilai sebesar 21,96% dari kadar 0% ke 6%, menunjukkan *Styrofoam* berpengaruh signifikan terhadap pengisian rongga secara menyeluruh
2	*VMA*	15,90	15,49	15,22	15,1	15,3	Nilai *VMA* menurun secara bertahap hingga kadar 6% dengan signifikansi 15,10% dari

Lanjutan Tabel 5.19 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Volumetrik

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
							campuran 0%. Kadar 6% menghasilkan nilai terendah yang menandakan pengisian rongga agregat paling efisien.
3	*VFWA*	73,67	76,32	77,78	78,43	77,39	Nilai *VFWA* mengalami signifikansi 6,46%, antara kadar 0% dan 6%. Peningkatan tertinggi pada kadar 6% menunjukkan kemampuan aspal melapisi agregat
4	Densitas	2,28	2,30	2,30	2,31	2,30	Nilai densitas meningkat tipis sebesar 1,32% dari kadar 0% ke 6%, menunjukkan peningkatan densitas campuran. Perbedaan antar kadar relatif kecil, menandakan distribusi binder yang seragam dan stabil

Tabel 5.20 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Kekuatan

No	Pengujian	*Kadar Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
1	Stabilitas	912	1092	1564	1648	1564	. Nilai stabilitas meningkat signifikan sebesar 736 kg atau 80,77% dari kadar 0% ke 6% . Kadar 6% menunjukkan nilai tertinggi dan performa paling Stabil terhadap beban
2	*Flow*	3,62	3,27	2,84	2,44	2,50	Signifikansi pada kadar 6% dibandingkan 0% menunjukkan penurunan *Flow* sebesar 32,60%, yang disebabkan oleh meningkatnya kekakuan aspal sehingga kemampuan deformasinya berkurang
3	*MQ*	251,84	333,94	550,70	675,41	625,60	Nilai *Marshall Quotient* meningkat 168,19%, dari kadar 0% ke 6%, menunjukkan campuran

Lanjutan Tabel 5.20 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Kekuatan

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
							menjadi lebih kaku. Kadar 6% menghasilkan nilai tertinggi, menandakan keseimbangan optimal antara kekuatan dan deformasi plastis.
4	*ITS*	604,33	643,89	720,26	785,63	716,13	Nilai *ITS* juga menunjukkan kenaikan yang signifikan dari 0% hingga kadar 6% yaitu 30%, menandakan peningkatan kuat tarik campuran dengan penambahan *Styrofoam*

Tabel 5.21 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Durabilitas

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
1	*IRS*	91,10	94,87	96,85	97,90	95,96	Nilai *IRS* meningkat signifikan pada kadar 0% hingga pada kadar 6%, mencapai

Lanjutan Tabel 5.21 Perbandingan Kinerja Campuran Berbagai Penambahan Kadar Limbah *Styrofoam* pada Aspal Pen 60/70 Gradasi *Superpave* Parameter Durabilitas

No	Pengujian	Kadar *Styrofoam* (%)					Keterangan
		0	2	4	6	8	
							7,48%, menunjukkan peningkatan stabilitas material dalam kondisi lembab hingga kadar *Styrofoam* 6%.
2	*TSR*	81,68	85,17	87,58	88,80	85,80	*TSR* mengalami kenaikan 0% menuju kadar 6% dengan signifikansi 8,72%, mengindikasikan peningkatan ketahanan terhadap gaya tarik yang terjadi ketika kondisi lembab

Hasil pengujian volumetrik menunjukkan bahwa penambahan *Styrofoam* memberikan pengaruh nyata terhadap struktur rongga campuran. Nilai *VITM* menunjukkan penurunan dari 4,60% pada kadar 0% menjadi nilai terendah 3,59% pada kadar 6%, yang mengindikasikan bahwa campuran pada kadar tersebut mencapai tingkat densitas tertinggi dan rongga udara terbaik untuk meningkatkan stabilitas campuran. Hal serupa terlihat pada nilai *VMA*, yang turun dari 15,90% menjadi 15,10% pada kadar 6%, menandakan pengisian rongga agregat yang paling efisien terjadi pada kadar tersebut. Di sisi lain, nilai *VFWA* meningkat dari 73,67% menjadi 78,43% pada kadar 6%, menunjukkan bahwa proporsi rongga agregat yang terisi aspal paling optimal juga terjadi pada komposisi tersebut. Secara keseluruhan, parameter volumetrik ini memperlihatkan bahwa kadar 6% menghasilkan keseimbangan terbaik dalam hal densitas, efisiensi pengisian rongga, dan kemampuan aspal mengikat agregat.

Dari sisi struktural, parameter mekanik aspal seperti penetrasi, daktilitas, dan

titik lembek menunjukkan perubahan yang signifikan akibat penambahan *Styrofoam*. Nilai penetrasi menurun dari 63,6 menjadi 58,9, yang berarti aspal menjadi lebih keras seiring meningkatnya kadar *Styrofoam*. Kekerasan ini dapat memberikan manfaat terhadap stabilitas struktural, tetapi penurunan daktilitas yang cukup drastis dari 150 cm menjadi 96 cm pada kadar 8% mengindikasikan bahwa campuran pada kadar tinggi menjadi kurang elastis dan lebih rentan terhadap retak. Peningkatan titik lembek dari 49°C menjadi 52,5°C menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi plastis pada temperatur tinggi, yang merupakan keunggulan dari modifikasi *Styrofoam*. Dengan demikian, dari perspektif struktural, kadar menengah (4–6%) memberikan kombinasi kekerasan, elastisitas, dan ketahanan terhadap deformasi yang lebih seimbang dibandingkan kadar rendah atau kadar tinggi.

Parameter durabilitas yang meliputi titik nyala, titik bakar, dan berat jenis memperlihatkan kecenderungan positif terhadap peningkatan kadar *Styrofoam*. Kenaikan titik nyala dari 332°C menjadi 353°C dan titik bakar dari 339°C menjadi 358°C mengindikasikan peningkatan ketahanan terhadap suhu tinggi sehingga campuran lebih aman dan stabil ketika terjadi kenaikan temperatur ekstrem. Berat jenis campuran meningkat dari 1,025 menjadi 1,178 pada kadar 8%, yang menunjukkan bahwa material menjadi lebih padat dan tahan terhadap kerusakan akibat lalu lintas maupun perubahan suhu lingkungan. Namun, peningkatan densitas dan ketahanan termal ini perlu dipertimbangkan dengan penurunan elastisitas pada kadar tinggi, yang berpotensi menurunkan umur layanan jika retak terjadi lebih cepat. Pada titik ini, kadar 6% kembali memberikan kompromi paling baik karena menghasilkan durabilitas tinggi tanpa mengorbankan sifat elastis yang diperlukan untuk mempertahankan fleksibilitas lapisan.

Dengan mempertimbangkan seluruh parameter volumetrik, struktural, dan durabilitas kadar *Styrofoam* 6% merupakan kadar yang memberikan perubahan paling signifikan dan paling konsisten dibandingkan seluruh kadar lainnya. Pada kadar ini, nilai *VITM*, *VMA*, dan *VFWA* mencapai konfigurasi optimum yang menunjukkan struktur rongga paling stabil; sifat fisik seperti penetrasi, titik lembek, dan daktilitas berada dalam keseimbangan yang ideal; sementara durabilitas

meningkat tanpa menimbulkan penurunan fleksibilitas yang berlebihan. Kadar ini menjadi titik tengah yang memberikan peningkatan paling berarti pada performa campuran tanpa menciptakan efek samping negatif pada aspek mekanis. Oleh karena itu, kadar 6% dapat ditetapkan sebagai kadar yang paling signifikan memberikan peningkatan kualitas dan paling layak digunakan dalam modifikasi aspal Pen 60/70 berbasis *Superpave*.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil investigasi laboratorium terhadap pengaruh penambahan limbah *Styrofoam* pada aspal Pen 60/70 untuk campuran *Superpave* dengan penambahan limbah *Styrofoam*, dapat dirumuskan kesimpulan berikut.

1. Penambahan *Styrofoam* memberikan pengaruh volumetrik paling signifikan pada kadar 6%, ditandai dengan meningkatnya nilai *VFWA* secara dominan serta menurunnya *VITM* dalam rentang yang masih memenuhi standar. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengisian rongga agregat oleh binder menjadi lebih efisien dan menghasilkan campuran yang lebih padat serta stabil.
2. Dari aspek struktural, kadar 6% merupakan kadar paling optimum, karena peningkatan stabilitas, *ITS*, dan *Marshall Quotient* mencapai nilai tertinggi, sementara *Flow* menurun signifikan sehingga campuran lebih kaku dan mampu menahan deformasi. Hal ini menegaskan bahwa campuran memiliki kekuatan struktural paling baik pada kadar tersebut.
3. Durabilitas campuran juga menunjukkan peningkatan signifikan pada kadar 6%, yang terlihat dari peningkatan *IRS* dan *TSR* sebagai indikator ketahanan terhadap kerusakan oleh air. Kenaikan ini menunjukkan kemampuan campuran untuk mempertahankan stabilitasnya meskipun berada dalam kondisi perendaman.

Secara keseluruhan, kadar *Styrofoam* optimum berada pada level 6%, di mana seluruh parameter volumetrik, struktural, dan durabilitas mencapai puncak atau nilai positif tertinggi, masih dalam rentang spesifikasi nasional. Penambahan lebih dari 6% berisiko menurunkan sebagian atau seluruh parameter penting kinerja campuran.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, dirumuskan beberapa rekomendasi sebagai

berikut.

1. Campuran *Superpave* dengan penambahan limbah *Styrofoam* direkomendasikan menggunakan kadar 6%, karena kadar ini memberikan performa terbaik dari aspek volumetrik, struktural, maupun durabilitas. Penerapannya di lapangan perlu disertai pengendalian suhu pencampuran dan pemadatan agar proses pelelehan *Styrofoam* berlangsung optimal dan menghasilkan homogenisasi yang baik..
2. Penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan pengujian rheologi binder seperti DSR, BBR, dan uji penuaan RTFO/PAV untuk mengetahui perubahan sifat viskoelastis aspal termodifikasi *Styrofoam* secara lebih menyeluruh. Selain itu, pengujian ketahanan jangka panjang seperti rutting test, fatigue test, dan wheel tracking penting dilakukan agar perilaku campuran terhadap beban berulang dapat diprediksi secara akurat.
3. Perlu dilakukan eksplorasi terhadap ukuran partikel *Styrofoam* atau bentuk fisiknya (granular, serbuk halus, pellet) karena variasi ukuran dapat memengaruhi proses pelelehan, distribusi dalam binder, dan performa campuran. Penelitian lebih lanjut juga dapat mempertimbangkan kombinasi modifikasi dengan polimer lain untuk meningkatkan stabilitas campuran.
4. Meskipun kadar 6% merupakan kadar optimum pada penelitian ini, penelitian lanjutan dapat meninjau kadar di bawah 2% atau di atas 8% untuk mengetahui batas maksimum dan minimum penggunaan *Styrofoam* sebagai bahan penambahan. Hal ini penting untuk memastikan konsistensi performa dalam berbagai kondisi perkerasan.
5. Penggunaan limbah *Styrofoam* sebagai bahan tambah campuran aspal perlu dilengkapi dengan kajian *Life Cycle Assessme*nt (*LCA*) untuk menilai potensi pengurangan beban lingkungan. Pengkajian ini dapat membantu memastikan bahwa pemanfaatan limbah *Styrofoam* benar-benar memberikan manfaat ekologis dan tidak menimbulkan efek samping jangka panjang.
6. Proses pencampuran perlu dilakukan penentuan kecepatan putaran mixer, suhu pencampuran dan waktu terhadap penambahan kadar *Styrofoam* yang digunakan agar hasil yang diperoleh dapat lebih akurat. Penggunaan alat

dengan spesifikasi teknis yang seragam sangat dianjurkan untuk menghindari perbedaan hasil akibat variasi peralatan.

7. Disarankan agar penelitian berikutnya menambahkan uji viskositas pada kadar *Styrofoam* 8% untuk mengetahui perubahan perilaku alir aspal pada kadar tinggi. Uji ini penting karena kadar *Styrofoam* besar dapat memengaruhi kemudahan pencampuran dan pemadatan.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Khateeb, G. G., Al-Akhras, N. M., & Khedaywi, T. S. (2017). Effect of *Superpave* restricted zone on volumetric and compaction properties of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology, 10*(6), 488–496.

Al-Mistarehi, W., Khedaywi, T. S., & Obaidat, Y. T. (2019). Characterization of asphalt binder modified with polystyrene using *Superpave* specification. *International Journal of Civil Engineering and Technology, 10*(7), 76–89.

Alpius, A., Rahman, M., Samudra, M., & Elizabeth. (2022). Pengaruh penambahan limbah *Styrofoam* terhadap kinerja campuran AC-WC. *Paulus Civil Engineering Journal, 4*(1), 80–87.

Atakan, M., Yılmaz, M. H., & Türkmen, M. (2021). Effects of waste *EPS* on physical properties of bituminous mixtures. *Construction and Building Materials, 300*, 1–12.

Badan Standardisasi Nasional. (2007). *Pedoman pelaksanaan lapis campuran beraspal panas (SNI 03-1737-1989)*. BSN.

Behnood, A., & Gharehveran, M. M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal, 112*, 766–791.

Blash, D. A. M. A. (2023). Design and properties of crumb rubber aggregates additive in hot mixture asphalt concrete. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 11*(12), 2104–2113.

Budi, T., Setiawan, H., & Firmansyah, D. (2023). [Judul artikel dalam Jurnal Rekayasa Mesin]. *Jurnal Rekayasa Mesin, 18*(2), 241–252.

Dahim, M. A., Mosaby, M., El Morabet, R., Khan, R. A., Alqadhi, S., Khan, N. A., Ben Kahla, N., Neklonskyi, I., & Borysova, L. (2021). *Superpave* design mixture performance evaluation using Epolene modifier for cold semi-arid

climatic region of Saudi Arabia. *Archives of Materials Science and Engineering, 112*(2), 49–54.

Desmond, J., Raji, B., & Hassan, N. (2024). Influence of polystyrene-modified aspal on thermal stability and binder cohesion. *Journal of Materials in Civil Engineering, 36*(1), 1–12.

Fachrudini, M. I., Bakhtiar, A., & Kolokijie, G. R. (2025). *Studi peningkatan perkerasan lentur (flexible pavement) menggunakan metode Bina Marga 2024 pada ruas Jalan Nasional III Jawa Timur*. Jurnal Rekayasa Sipil, 15(1), 18–27.

Hadi, M. A., Apriliyanti, H. R., & Asrorunniam, A. F. (2025). Investigasi pengaruh zona larangan pada gradasi *Superpave* terhadap standar Marshall. *Berkala FSTPT, 3*(x), 1–9.

Hidalgo-Crespo, J., Moreira, C. M., Jervis, F. X., Soto, M., Amaya, J. L., & Banguera, L. (2022). Circular economy of *Expanded Polystyrene* container production: Environmental benefits of household waste recycling considering renewable energies. *Energy Reports, 8*, 306–311.

Hussain, A., & Khan, M. K. (2019). Rutting and moisture susceptibility assessment of asphalt wearing course gradations. *The Civil Engineering Journal, 3*, 37.

Ibrahim, M. K., Yao, L. J., & Ismail, A. (2012). Mechanical properties of polystyrene-modified asphalt binder. *Construction and Building Materials, 28*(1), 545–555.

Ji, T., Hao, P., She, H., Yang, K., Li, H., Wang, D., Kang, R., & Liu, J. (2023). Durability behavior of asphalt mixtures in regard to material properties and gradation type. *Frontiers in Materials, 10*, 1–9.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2: Divisi 6 – Perkerasan beraspal*. Direktorat Jenderal Bina Marga.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2024). *Manual desain perkerasan jalan 2024*. Kementerian PUPR.

Khedaywi, T. S., Al-Khateeb, G., & Al-Mistarehi, W. (2016). Performance evaluation of polystyrene-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials, 123*, 423–435.

MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science, 373*(6550), 61–65.

Mulatu, A., Quezon, E. T., & Gudina, O. (2021). Evaluation of the HMA performance using combined effects of marble waste dust filler and *Superpave* aggregate gradation. *Australian Journal of Civil Engineering, 19*(2), 184–194.

Nasot, M., Adnan, & Muis, A. (2022). Pengaruh penambahan *Styrofoam* terhadap karakteristik Marshall pada lapisan aspal beton AC-WC. *Jurnal Karajata Engineering, 2*(2), 10–18.

Nawir, D., & Mansur, A. Z. (2025). *Rekayasa perkerasan jalan: Prinsip, praktik, dan inovasi*. Ruang Tentor.

Nurherdiana, S. D., Wahyudi, B., Stefanny, M. J., Karlina, A., Yogaswara, R., Jalil, M. J., & Fansuri, H. (2023). Characteristics of *Styrofoam* waste-based membrane through vapor and liquid-induced phase inversion process. *Jurnal, 8*(1), 37–48.

Ottos, C. G., & Oparaeli, K. I. (2018). Influence of waste polythene bag on the index of retained stability of asphalt concretes under moisture for low traffic volume roads in Obio/Akpor Local Government Area of Rivers State. *International Journal of Trend in Research and Development*, 209–214.

Rosyad, F., & Sari, I. P. (2024). Analisis pengaruh penambahan limbah *Styrofoam* pada aspal porus AC-WC terhadap durabilitas dan fleksibilitas. *Ensiklopedia of Journal, 6*(3), 305–309.

Setiawan, R., Suryaningsih, D., & Hidayat, M. (2022). Penelitian sampah *Styrofoam* di laut Indonesia: Analisis dan solusi. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan, 6*(1).

Tandiabang, R., Samudra, M., Alpius, & Elizabeth. (2022). Pengaruh *Styrofoam* sebagai bahan tambah campuran AC-WC batu Sungai Tetean Kabupaten Mamasa. *Paulus Civil Engineering Journal, 4*(1), 80–87.

Yousif, M., Ahmed, K., & Salman, J. (2024). Effect of polymer-modified binder on density and void characteristics of asphalt mixtures. *International Journal of Civil Infrastructure, 15*(1), 55–64.

Yuniarti, E., Wibowo, A., & Pradipta, R. (2024). Thermal resistance and ignition behaviour of polystyrene-modified asphalt binder. *Materials Today: Proceedings, 72*, 150–159.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	23,83	23,87
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	47,00	47,07
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	23,17	23,20
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	24,90	25,21
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,07	1,34
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	47,02	47,11
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	22,12	21,90
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,05	1,30
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,019	1,031
10	Rata-rata BJ Aspal	1,025	

Yogyakarta, November 2025

Diperiksa Oleh
Ketua Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Sarjito, M.Hum, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kaleb. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Arietka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 2 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 + 2% *Styrofoam*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 2% *Styrofoam*
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	23,84	23,84
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	47,04	47,04
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	23,20	23,20
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	24,97	24,94
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,13	1,10
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	47,15	47,09
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	22,18	22,15
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,02	1,05
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,108	1,048
10	Rata-rata BJ Aspal	1,078	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Ketua Program Studi Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernai Lubis, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng
NIK : 0[illegible]

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Farhan Arieffa A
NIM : 21 511 012

Lampiran 3 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 3 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 + 4% Styrofoam

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 4% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	24,08	24,08
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	47,29	47,29
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	23,21	23,21
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	25,10	25,17
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,02	1,09
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	47,43	47,37
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	22,33	22,20
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	0,88	1,01
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,159	1,079
10	Rata-rata BJ Aspal	1,119	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Ketua Program Studi Jurusan Teknik Sipil

Ir. Dwi Ratnaningsih, M.Sc., Ph.D., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Arieffka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 4 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 4 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 + 6% Styrofoam

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 6% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	23,53	23,53
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	47,14	47,14
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	23,61	23,61
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	25,04	25,37
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,51	1,84
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	47,28	47,41
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	22,24	22,04
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,37	1,57
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,102	1,172
10	Rata-rata BJ Aspal	1,14	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Rekayasa Jalan Raya

Ir. Ahmad Mujaka, S.T., M.Eng., IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Farhan Arietka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 5 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 5 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 + 8% Styrofoam

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 8% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	24,08	24,08
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	47,29	47,29
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	23,21	23,21
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	25,09	25,16
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,01	1,08
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	47,37	47,52
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	22,28	22,36
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	0,93	0,85
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,086	1,271
10	Rata-rata BJ Aspal	1,18	

Diperiksan Oleh
Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Farhan Arielka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 6 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0%

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 6 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70

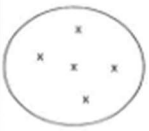
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	12.30 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	13.00 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	13.00 WIB	
	Selesai	27 °C	15.30 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	25 °C	15.30 WIB	
	Selesai	25 °C	15.40 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	65,00	64,00			
2	63,00	63,00			
3	65,00	62,00			
4	63,00	63,00			
5	63,00	65,00			
Rata2	63,80	63,40			
Rata2	63,6				

Yogyakarta, November 2025

Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlinti Kusbiari, M.Eng, IPM, ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Arietka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 7 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 7 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 + 2% Styrofoam

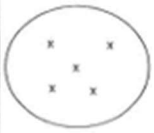
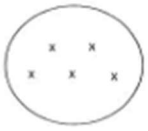
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 2% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	12.30 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	13.00 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	13.00 WIB	
	Selesai	27 °C	15.30 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	25 °C	15.30 WIB	
	Selesai	25 °C	15.40 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	62,00	63,00			
2	63,00	64,00			
3	62,00	63,00			
4	61,00	62,00			
5	62,00	61,00			
Rata2	62,00	62,60			
Rata2	62,3				

Yogyakarta, November 2025

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Arietfka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 8 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4%

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 8 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 + 4% Styrofoam

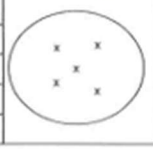
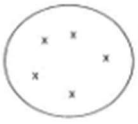
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 4% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	12.30 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	13.00 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	13.00 WIB	
	Selesai	27 °C	15.30 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	25 °C	15.30 WIB	
	Selesai	25 °C	15.40 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	62,00	61,00			
2	62,00	62,00			
3	63,00	61,00			
4	61,00	63,00			
5	62,00	61,00			
Rata2	62,00	61,60			
Rata2	61,8				

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Arieffka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 9 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 9 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 + 6% Styrofoam

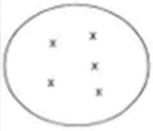
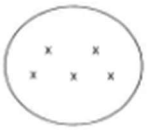
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 6% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	12.30 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	13.00 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	13.00 WIB	
	Selesai	27 °C	15.30 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	25 °C	15.30 WIB	
	Selesai	25 °C	15.40 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	62,00	61,00			
2	60,00	61,00			
3	60,00	62,00			
4	61,00	61,00			
5	61,00	63,00			
Rata2	60,80	61,60			
Rata2	61,2				

Yogyakarta, November 2025

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Arieftka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 10 Pemeriksaan Titik Nyala dan Bakar Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 10 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 + 8% Styrofoam

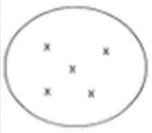
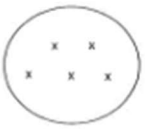
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 8% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	12.30 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	13.00 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	13.00 WIB	
	Selesai	27 °C	15.30 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	25 °C	15.30 WIB	
	Selesai	25 °C	15.40 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	60,00	50,00			
2	68,00	57,00			
3	62,00	58,00			
4	58,00	58,00			
5	61,00	57,00			
Rata2	61,80	56,00			
Rata2	58,9				

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Kalab. Jalan Raya	
Ir. Bernardus Anggo S., M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muh Fathan Arieffka A
NIK : 07 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 21 511 012

Lampiran 11 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 11 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	10.15 WIB	
	Selesai pemanasan	150 °C	10.30 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	150 °C	10.30 WIB	
	Selesai	28 °C	12.22 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	28 °C	13.47 WIB	
	Selesai	339 °C	14.17 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	332 °C	339 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	332 °C	339 °C	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. [illegible], M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 12 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 12 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70 + 2% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 2% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 ^{o}C	12.00 WIB	
	Selesai pemanasan	150 ^{o}C	12.30 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	150 ^{o}C	12.30 WIB	
	Selesai	28 ^{o}C	14.00 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	28 ^{o}C	14.10 WIB	
	Selesai	350 ^{o}C	15.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	345 ^{o}C	350 ^{o}C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	345 ^{o}C	350 ^{o}C	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bertian Kusbari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 13 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 13 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70 + 4% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 4% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.00 WIB	
	Selesai pemanasan	150 °C	09.30 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	150 °C	09.30 WIB	
	Selesai	28 °C	11.30 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	28 °C	13.00 WIB	
	Selesai	352 °C	14.45 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	348 °C	352 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	348 °C	352 °C	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Ibnu Rusdi, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 14 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 14 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70 + 6% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 6% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	11.15 WIB	
	Selesai pemanasan	150 °C	11.30 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	150 °C	11.30 WIB	
	Selesai	28 °C	13.22 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	28 °C	13.25 WIB	
	Selesai	355 °C	15.15 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	350 °C	355 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	350 °C	355 °C	

Yogyakarta, November 2025

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Burhan Ghozali, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 15 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8%

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 15 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70 + 8% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 8% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	08.30 WIB	
	Selesai pemanasan	150 °C	09.00 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	150 °C	09.00 WIB	
	Selesai	28 °C	11.00 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	28 °C	13.10 WIB	
	Selesai	358 °C	15.05 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	353 °C	358 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	353 °C	358 °C	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manajer Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bachtiar Kahfie, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 16 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 16 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.20 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	09.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 °C	09.35 WIB	
	Selesai	28 °C	10.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 °C	14.15 WIB	
	Selesai	50 °C	14.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)				Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I		Benda Uji II		I	II
1	5 °C	0	detik	0	detik		
2	10 °C	60	detik	60	detik		
3	15 °C	120	detik	120	detik		
4	20 °C	180	detik	180	detik		
5	25 °C	240	detik	240	detik		
6	30 °C	300	detik	300	detik		
7	35 °C	360	detik	360	detik		
8	40 °C	420	detik	420	detik		
9	45 °C	480	detik	480	detik	48°C	
10	50 °C		detik	535	detik		50°C

Diperiksa Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernas Kusnari, M.Eng., PhD., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 17 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 17 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 + 2% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 2% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.20 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	09.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 °C	09.35 WIB	
	Selesai	28 °C	10.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 °C	14.15 WIB	
	Selesai	50 °C	14.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)				Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I		Benda Uji II		I	II
1	5 °C	0	detik	0	detik		
2	10 °C	55	detik	57	detik		
3	15 °C	115	detik	118	detik		
4	20 °C	170	detik	172	detik		
5	25 °C	225	detik	227	detik		
6	30 °C	280	detik	282	detik		
7	35 °C	335	detik	338	detik		
8	40 °C	390	detik	392	detik		
9	45 °C	445	detik	447	detik		
10	50 °C	490	detik	493	detik	49°C	50°C

Diketahui Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 18 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3202, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 18 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 + 4% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 4% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.20 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	09.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 °C	09.35 WIB	
	Selesai	28 °C	10.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 °C	14.15 WIB	
	Selesai	50 °C	14.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)				Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I		Benda Uji II		I	II
1	5 °C	0	detik	0	detik		
2	10 °C	62	detik	63	detik		
3	15 °C	125	detik	126	detik		
4	20 °C	190	detik	192	detik		
5	25 °C	255	detik	258	detik		
6	30 °C	320	detik	323	detik		
7	35 °C	385	detik	388	detik		
8	40 °C	450	detik	452	detik		
9	45 °C	510	detik	513	detik		
10	50 °C	570	detik	573	detik	50°C	
11	55 °C		detik	633	detik		51°C

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 19 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 19 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 + 6% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 6% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.20 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	09.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 °C	09.35 WIB	
	Selesai	28 °C	10.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 °C	14.15 WIB	
	Selesai	52 °C	14.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)				Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I		Benda Uji II		I	II
1	5 °C	0	detik	0	detik		
2	10 °C	65	detik	67	detik		
3	15 °C	130	detik	133	detik		
4	20 °C	200	detik	203	detik		
5	25 °C	270	detik	273	detik		
6	30 °C	340	detik	344	detik		
7	35 °C	410	detik	415	detik		
8	40 °C	480	detik	485	detik		
9	45 °C	550	detik	555	detik		
10	50 °C	620	detik	625	detik		50°C
11	55 °C	690	detik		detik	52°C	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Ucuan Sudjati, M.Eng, IPM, ASEAN.Eng
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Moh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 20 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8%

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 20 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 + 8% Styrofoam

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

1 Sumber Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 8% Styrofoam
3 Diuji Pada : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	28 °C	09.20 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	09.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 °C	09.35 WIB	
	Selesai	28 °C	10.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 °C	14.15 WIB	
	Selesai	53 °C	14.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)				Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I		Benda Uji II		I	II
1	5 °C	0	detik	0	detik		
2	10 °C	70	detik	73	detik		
3	15 °C	140	detik	144	detik		
4	20 °C	215	detik	218	detik		
5	25 °C	290	detik	295	detik		
6	30 °C	365	detik	370	detik		
7	35 °C	440	detik	446	detik		
8	40 °C	515	detik	522	detik		
9	45 °C	590	detik	597	detik		
10	50 °C	665	detik	672	detik		
11	55 °C	748	detik	740	detik	53°C	52°C

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bachtiar Ibrahim, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Arieffka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 21 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 0%

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 21 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

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

1 Contoh dari : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diperiksa tg : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

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

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	150 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	150 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	150 cm	

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. [illegible] M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK. : 21 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 22 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 2%



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 22 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 + 2% Styrofoam

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

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

1 Contoh dari : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 2% Styrofoam
3 Diperiksa tg : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	Persiapan benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans ± 135°C
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang ± 28°C
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25°C	60 menit	suhu water bath ± 25°C
4	Pemeriksaan	Diuji daktilitas pada suhu 25°C, kecepatan 5 cm per menit	18 menit	suhu alat ± 25°C

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	107 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	113 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	110 cm	

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 23 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 4%



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 23 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 + 4% Styrofoam

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

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

1 Contoh dari : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 4% Styrofoam
3 Diperiksa tg : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	Persiapan benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans ± 135°C
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang ± 28°C
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25°C	60 menit	suhu water bath ± 25°C
4	Pemeriksaan	Diuji daktilitas pada suhu 25°C, kecepatan 5 cm per menit	17 menit	suhu alat ± 25°C

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	106 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	103 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	104,5 cm	

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Yos Stefan Kurniadi, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 24 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 6%

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 24 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 + 6% Styrofoam

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

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

1 Contoh dari : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 6% Styrofoam
3 Diperiksa tg : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	Persiapan benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans ± 135°C
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang ± 28°C
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25°C	60 menit	suhu water bath ± 25°C
4	Pemeriksaan	Diuji daktilitas pada suhu 25°C, kecepatan 5 cm per menit	17 menit	suhu alat ± 25°C

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	100 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	101 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	100,5 cm	

Diuntkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Kartika Kusuma, M.Eng., PM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 25 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 *Styrofoam* 8%

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 25 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 + 8% Styrofoam

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

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

1 Contoh dari : Aspal Pertamina Pen 60/70
2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70 + 8% Styrofoam
3 Diperiksa tg : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	Persiapan benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans ± 135°C
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang ± 28°C
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25°C	60 menit	suhu water bath ± 25°C
4	Pemeriksaan	Diuji daktilitas pada suhu 25°C, kecepatan 5 cm per menit	17 menit	suhu alat ± 25°C

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	95 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	97 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	96 cm	

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernah Yunpri, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 26 Pemeriksaan Kelarutan TCE Aspal Pen 60/70 Murni

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 26 Pemeriksaan Kelarutan Aspal PEN 60/70 dalam *TCE*

PEMERIKSAAN KELARUTAN ASPAL DALAM CCl4 / TCE

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan	
			Wakktu	Suhu
1	Persiapan	Mulai	13.20 WIB	28 °C
		Selesai	13.30 WIB	28 °C
2	Penimbangan	Mulai	13.30 WIB	28 °C
3	Pelarutan	Mulai	13.40 WIB	28 °C
4	Penyaringan	Mulai	13.45 WIB	28 °C
		Selesai	14.15 WIB	28 °C
5	Di Oven	Mulai	14.15 WIB	130 °C
6	Penimbangan	Mulai	14.30 WIB	28 °C

Hasil pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Benda Uji		Keterangan
		1	2	
1	Berat erlen meyer kosong	58,58 gr	68,89 gr	
2	Berat erlen meyer kosong + Aspal	60,53 gr	71,09 gr	
3	Berat Aspal (2 - 1)	1,95 gr	2,20 gr	
4	Berat kertas saring bersih	0,59 gr	0,58 gr	
5	Berat kertas saring bersih + mineral	0,61 gr	0,61 gr	
6	Berat mineral (5 - 4)	0,02 gr	0,03 gr	
7	Prosentase mineral (6/3x100%)	1,03 %	1,36 %	
8	Aspal yang larut (100% - 7)	99,0 %	99 %	
9	Rata-rata Aspal yang larut (%)	98,805	%	

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Ketua Departemen Jurusan Teknik Sipil

Ir. Rr. [illegible], M.Eng., Ph.D., ASEAN.Eng.
NIK : 21 511 0181

Mengetahui
Kaluh. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 27 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 27 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR

RUJUKAN : SNI 03-1969-2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : Juli 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	1633,68	1596,50	1615,09
2	Berat benda uji dalam Air (BA) gr	1000,00	1000,00	1000,00
3	Berat benda uji dikering oven (BK) gr	1610,47	1568,35	1589,41
4	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(BJ - BA}$	2,541	2,629	2,585
5	Berat jenis (SSD) = $\frac{BJ}{(BJ - BA}$	2,578	2,676	2,627
6	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,638	2,759	2,699
7	Penyerapan air = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	1,441	1,795	1,618
8	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,590	2,694	2,642

Yogyakarta, November 2025

Diperiksa Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernie Kusuri, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 28 Pemeriksaan Keausan Agregat Kasar

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 28 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles

PEMERIKSAAN KEAUSAN AGREGAT KASAR

AASHTO T 96 - 77 ; SNI 2417 : 2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : Juli 2025

No	Jenis Gradasi Saringan		B Benda Uji (gram)		Keterangan
	Lolos	Tertahan	1	2	
1	72.2 mm (3")	63.5 mm (2.5")			
2	63.5 mm (2.5")	50.8 mm (2")			
3	50.8 mm (2")	37.5 mm (1.5")			
4	37.5 mm (1.5")	25.4 mm (1")			
5	25.4 mm (1")	19.0 mm (3/4")			
6	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (0.5")	2500,00	2500,00	
7	12.5 mm (0.5")	09.5 mm (3/8")	2500,00	2500,00	
8	09.5 mm (3/8")	06.3 mm (1/4")			
9	06.3 mm (1/4")	04.75 mm (4")			
10	04.75 mm (No.4)	02.36 mm (No.8)			
11	JUMLAH BENDA UJI (A)		5000,00	5000,00	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		4762,75	4763,55	
13	KEAUSAN 100x = $\frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		4,745	4,729	
17	Rata-rata Keausan (%)		4,74		

Yogyakarta, November 2025

Diperiksa Oleh,
Ketua Program Studi Jurusan Teknik Sipil

Ir. Hanafi Ismeddiyanto, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 29 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 29 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT HALUS

RUJUKAN : SNI 1970 - 2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Halus
3 Diuji Pada : Juli 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	500,00	500,00	
2	Berat Vicnometer + Air (B) gr	645,49	640,23	
3	Berat Vicnometer + Air + benda uji (BT) gr	954,07	945,23	
4	Berat benda uji kering oven (BK)	487,55	488,23	
5	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(B+500)-BT}$	2,547	2,504	2,525
6	Berat jenis (SSD) = $\frac{500}{(B+500)-BT}$	2,612	2,564	2,588
7	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B+BK)-BT}$	2,724	2,665	2,694
8	Penyerapan air = $\frac{(500-BK)}{BK} \times 100\%$	2,554	2,411	2,482
9	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,636	2,584	2,610

Yogyakarta, November 2025

Disetujui Oleh
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Perdiansyah, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 21 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Ir. Muslim Ar Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 30 Pemeriksaan *Sand Equivalent (SE)*

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 30 Pemeriksaan Sand Equivalent

PEMERIKSAAN *SAND EQUIVALENT*

RUJUKAN : SNI 3423-2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Halus
3 Diuji Pada : Juli 2025

No.	Keterangan		Benda uji 1	Benda uji 2	Rata-rata
1	Persiapan, dan perendaman benda uji dalam larutan $CaCl_2$ selama (± 10.1 menit).	Mulai	14.15	15.06	
		Selesai	14.25	15.16	
2	Waktu pengendapan (benda uji setelah digojok sebanyak 90x, dan di tambah larutan $CaCl_2$)	Mulai	14.36	15.22	
		Selesai	14.56	15.42	
4	Clay reading (Pembacaan Lumpur) Inchi		4,00	3,80	3,90
5	Sand reading (Pembacaan Pasir)		2,80	2,80	2,80
6	$Sand\ Eqiuvalent = \frac{Sand\ Reading}{Clay\ Reading} \times 100\ \%$		70,00	73,68	71,84
7	Kandungan Lumpur = 100 - SE		30,00	26,32	28,16

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Koordinator Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Dr. Ing. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 31 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler* Debu

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 31 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Debu*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER* DEBU

RUJUKAN : SNI 2441-2011

1 Jenis Material : *Filler* Abu Batu
2 Sumber Material : Clereng
3 Diuji Pada : Juli 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	23,80	23,75	
2	Berat Vicnometer + Air gr	47,33	47,16	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	23,53	23,41	
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	31,55	30,41	
5	Berat *Filler* (4-1) gr	7,750	6,660	7,21
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	52,430	50,710	51,57
7	Berat Aquadest (6-4) gr	20,880	20,300	20,59
8	Volume *Filler* (3-7) gr	2,650	3,110	2,88
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	2,925	2,141	2,533

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh,
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Hadam Kurnia, M.Eng, IPM, ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 32 Pemeriksaan Kelekatan Agregat

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 32 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

PEMERIKSAAN KELEKATAN AGREGAT TERHADAP ASPAL

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : Juli 2025

Persiapan pemeriksaan

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

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	99%	
2	Sampel 2	97%	
	Rata-rata	98%	

Disahkan Oleh
Ir. Bernardus Dwiyanto, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti
Muh Fathan Ariefka A
NIM : 21 511 012

Lampiran 33 Pemeriksaan *Marshall Standard* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 KAO

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

PEMERIKSAAN SIFAT - SIFAT CAMPURAN ASPAL PANAS
DENGAN METODA MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

No. Benda Uji	Tinggi Benda Uji	Kadar Aspal	Berat Jenis Maks. Campuran	Berat (Gram) di Udara	Berat (Gram) dalam Air	Berat (Gram) SSD	Isi	Bj Bulk Campuran	(%) Rongga dlm camp (VITM)	(%) 2 Agrgt (VMA)	(%) Rongga terisi Aspal (VFWA)	Stabilitas di Baca	Stabilitas di Sesuaikan	Kelelehan Plastis (Flow)	Marshall Quotient (MQ)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
		% Total Campuran	100 / (100-B)/Gse - B/T	Data Timbangan Laborat	Data Timbangan Laborat	Data Timbangan Laborat	F - E	D / G	C - H x 100 / C	100 - (H x (100-B)) / Gsb	B x H / T (B x H / T)+I x 100	Data Pembc. Prov. Ring	Nilai Stabilitas (kg)	Data Pembc. Lab	M / N
1	65,42	65,42 4,50	2,437	1.160,88	687	1.183,50	496,50	2,338				80,0	1.014,5	3,12	
2	71,09	71,09		1.172,52	685,50	1.195,00	509,50	2,301				78,0	989,1	3,30	
3	64,28	69,273		1.175,15	671,50	1.188,00	516,50	2,275				76,0	963,8	3,35	
	66,93			1.169,52	681,33	1.188,83		2,304	5,46	14,12	65,06	78,0	989,11	**3,26**	303,41
1	67,37	5,00	2,420	1.163,83	640,00	1169,69	529,69	2,197				87,0	1.029,2	3,40	
2	67,6263			1.183,84	685,80	1.189,50	503,70	2,350				85,0	1.066,9	3,30	
3	67,24			1.178,59	682,90	1.183,00	500,10	2,357				83,0	1.041,8	3,45	
	67,4122	5,3		1.175,42	669,57	1.180,73		2,301	4,90	14,68	69,71	83,3	1.046,00	**3,39**	308,55
1	68,1333	5,50	2,402	1.176,84	679,00	1.191,50	512,50	2,296				90,0	1.116,9	3,60	
2	67,31			1.184,62	684,50	1.200,00	515,50	2,298				92,0	1.141,7	3,50	
3	68,37			1.170,62	670,00	1.187,00	517,00	2,264				96,0	1.191,4	3,35	
	67,94			1.177,36	677,83	1.192,83		2,286	4,84	15,68	71,81	92,7	1.150,00	**3,42**	336,26
1	67,4333	6,00	2,385	1.155,05	658,00	1.177,00	519,00	2,226				86,0	1.094,4	3,75	
2	65,3			1.163,60	672,50	1.177,50	505,00	2,304				85,0	1.081,7	3,60	
3	67,56			1.177,33	684,50	1.196,50	512,00	2,299				83,0	1.056,2	3,90	
	66,76			1.165,33	671,67	1.183,67		2,276	4,57	16,49	74,55	84,7	1.077,4	**3,75**	287,31
1	64,23	6,50	2,368	1.135,20	651,50	1.148,50	497,00	2,284				79,0	1.047,1	4,20	
2	64,63			1.132,12	650,00	1.147,50	497,50	2,276				80,0	1.060,3	4,30	
3	66,9733			1.146,79	655,50	1.165,50	510,00	2,249				81,0	1.073,6	4,15	
	65,27			1.138,04	652,33	1.153,83		2,269	4,19	17,19	77,53	80,0	1.060,3	**4,22**	251,26
									3-5	>15	>65		min 800	2 - 4	200 - 350

Yogyakarta, November 2025

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. [illegible] ASEAN Eng.
NIK : 21 511 0[illegible]

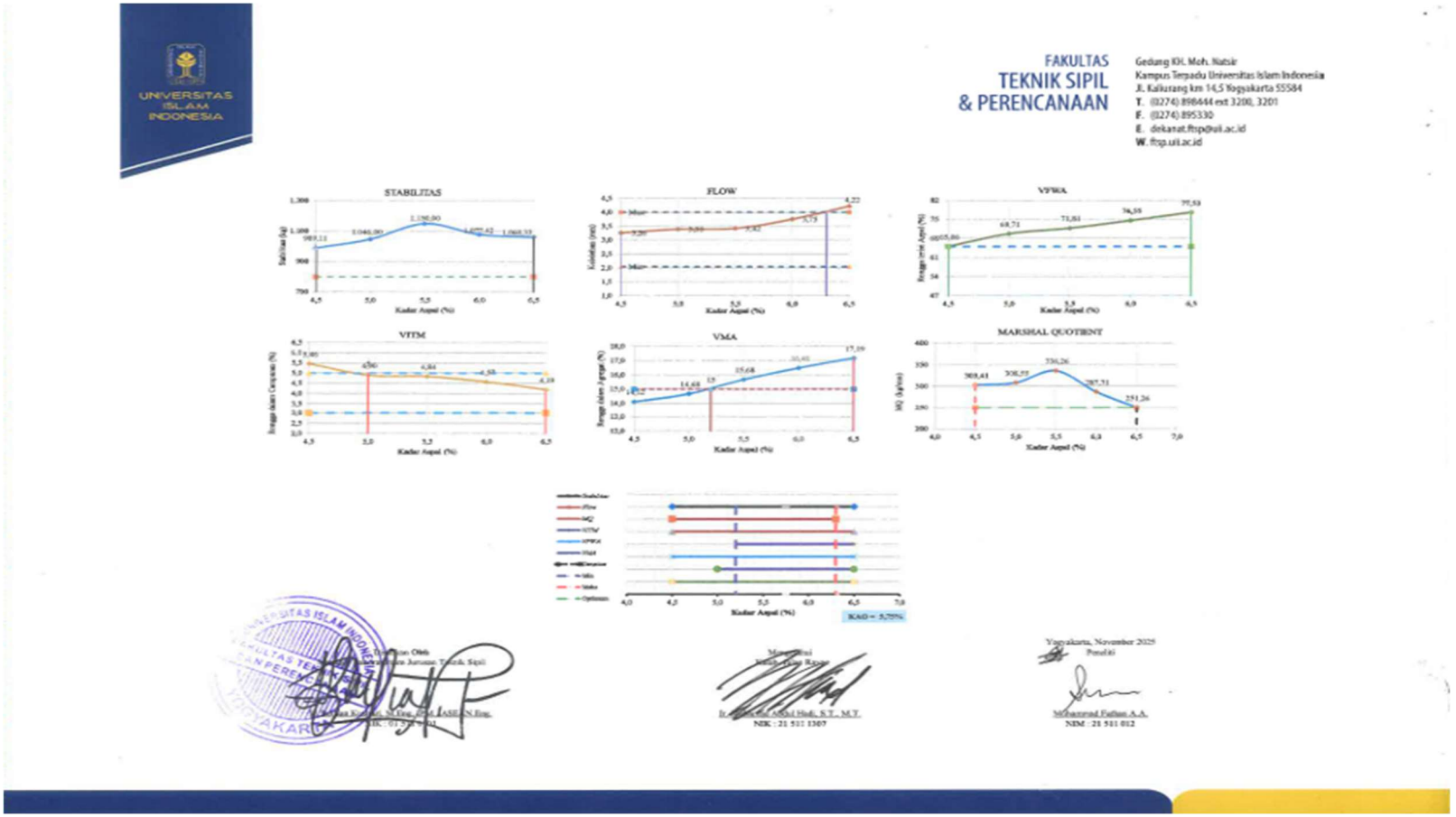
Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Farhan A.A.
NIM : 21 511 012

Lampiran 34 Grafik Hasil Pemeriksaan *Marshall Standard* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 KAO



Lampiran 35 Pemeriksaan *Marshall Standard* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

PEMERIKSAAN SIFAT - SIFAT CAMPURAN ASPAL PANAS
DENGAN METODA MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

No. Benda Uji	Tinggi Benda Uji	Kadar Aspal	Berat Jenis Maks. Campuran	Berat (Gram) di Udara	Berat (Gram) dalam Air	Berat (Gram) SSD	Isi	Bj Bulk Campuran	(%) Rongga dlm camp (VITM)	(%) 2 Agregt (VMA)	(%) Rongga terisi Aspal (VFWA)	Stabilitas di Baca	Stabilitas di Sesuaikan	Kelelehan Plastis (Flow)	Marshall Quotient (MQ)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
		% Total Campuran	100 / (100-B)/Gse + B/T	Data Timbangan Laborat	Data Timbangan Laborat	Data Timbangan Laborat	F - E	D / G	C - H x 100 / C	100 - (H x (100-B) / Gsb	(Bx H / T)=I x 100	Data Pembc. Proy. Ring	Nilai Stabilitas (kg)	Data Pembc. Lab	M / N
1	69,8	5,75	2,394	1.167,87	661,73	1.172,55	510,82	2,286	4,49	15,9	74,16	74,0	891,6	3,65	244,26
2	69,767	m1		1.164,49	660,91	1.151,35	500,44	2,287	4,45	15,87	74,34	75,0	903,6	3,60	251,00
3	71,07	0,00		1.157,95	652,13	1.160,60	508,47	2,277	4,87	16,23	72,50	78,0	939,8	3,60	261,04
	70,2123			1.356,77	654,92	1.161,50		2,283	4,60	16,00	73,67	75,7	911,6	3,61	251,84
1	67,3	5,75	2,394	1.176,65	668,95	1.180,79	511,84	2,299	3,95	15,43	76,64	78,0	982,5	3,30	298,03
2	66,2	m2		1.177,46	669,97	1.183,60	513,63	2,292	4,24	15,68	75,29	82,0	1.033,9	3,30	313,31
3	64,8	2,00		1.179,16	671,77	1.184,30	512,53	2,301	3,87	15,35	77,02	100,0	1.260,9	3,20	394,02
	66,1967			1.177,76	670,23	1.182,90		2,297	4,02	15,49	76,32	86,7	1.092,00	3,27	333,94
1	65,43	5,75	2,394	1.180,86	672,50	1186,13	513,63	2,299	3,95	15,43	76,64	110,0	1.395,1	2,80	498,27
2	65,03	m3		1.182,58	674,91	1.187,86	512,95	2,305	3,70	15,2	77,84	120,0	1.522,0	2,70	563,69
3	66,43	4,00		1.180,53	676,14	1.188,53	512,39	2,310	3,49	15,02	78,86	140,0	1.775,6	3,00	591,88
	65,63			1.182,32	674,52	1.187,51		2,304	3,71	15,22	77,78	123,3	1.564,00	2,84	550,70
1	66,13	5,75	2,394	1.184,70	678,51	1.188,50	519,99	2,298	3,99	15,46	76,45	120,0	1.522,0	2,50	608,79
2	66,07	m3		1.192,63	680,47	1.197,88	517,42	2,305	3,70	15,2	77,84	140,0	1.775,6	2,30	772,02
3	67,00	6,00		1.188,80	682,42	1.194,87	512,43	2,320	3,07	14,65	80,99	120,0	1.648,8	2,50	659,52
	65,73			1.192,04	680,47	1.197,09		2,307	3,59	15,10	78,43	130,0	1.648,00	2,44	675,41
1	65,27	5,75	2,394	1.169,65	684,17	1.194,79	510,62	2,291	4,29	15,72	75,07	125,0	1.585,4	2,20	720,63
2	63,77	m3		1.171,46	677,97	1.182,60	504,63	2,323	2,95	14,54	81,61	125,0	1.585,4	2,60	609,77
3	65,20	8,00		1.173,16	671,77	1.183,30	511,53	2,293	4,20	15,65	75,48	120,0	1.522,0	2,70	563,69
	64,75			1.171,76	677,97	1.186,90		2,302	3,81	15,30	77,19	123,3	1.564,00	2,50	625,60
									3-5	>15	>65		min 800	2 - 4	200 - 350

Disahkan Oleh
Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

[redacted]
NIK. 91 511 010

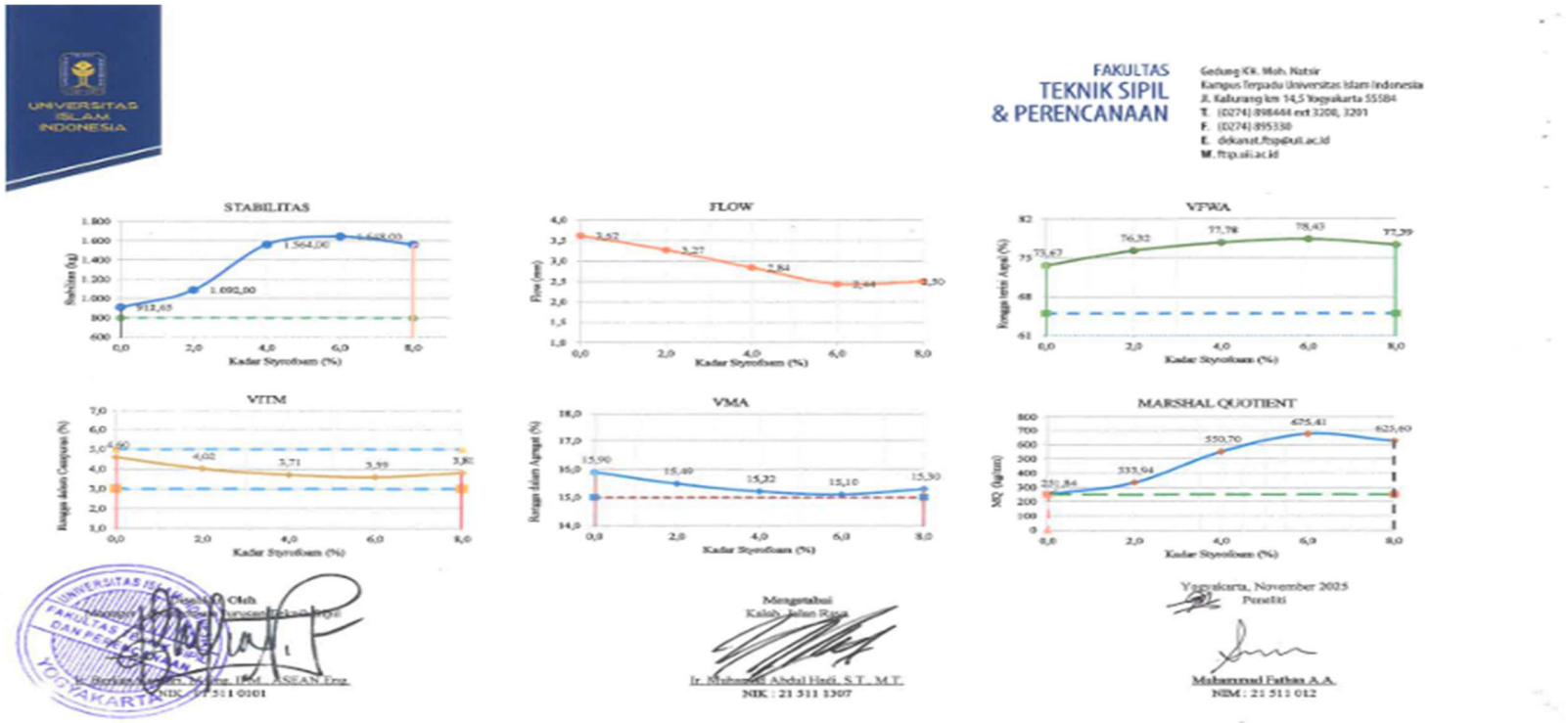
Mengetahui
Kaprodi Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muhammad Farhan A.A.
NIM : 21 511 012

Lampiran 36 Grafik Hasil Pemeriksaan *Marshall Standard*Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*



Lampiran 37 Pemeriksaan *ITS* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

HASIL PENGUJIAN ITS

Kadar Aspal	Metode		Tebal Sampel (mm) 1	2	3	rata2	koreksi	Diameter Sampel (Inchi) 1	2	3	rata3	A0	Arlogi Stability Mean	Kalibrasi	Adjust	Stability (kg) awal	rata2	MIN	Angka Koreksi Tebal Sampel MIN	MAX	Koreksi MIN	MAX	Angka Koreksi Diameter Tebal Sampel MIN	MAX	Koreksi MIN	MAX	ITS 0,5 JAM Kpa awal	rata2	MIN	REKAP	
5,75%	0%	1	66,90	65,50	64,50	65,63	0,89	4,03	4,01	3,99	4,01	0,16	13	21,31	277,09	246,61	259,88	600	68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	573,71	604,33	600	5,95	6,16
		2	66,00	66,90	65,30	66,07	0,89	3,97	3,98	3,98	3,98	0,16	13	21,31	277,09	246,61			68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,16	0,156	574,29			5,96	
		3	66,40	67,40	64,60	66,13	0,90	3,97	3,99	4,00	3,99	0,16	15	21,31	319,72	284,47			71,4	73	0,83	0,83	3,9	4	0,16	0,156	665,01			6,78	
	2%	1	66,57	64,66	64,15	66,59	0,93	3,98	3,98	3,99	3,98	0,16	15	21,31	319,72	297,06	283,81	600	63,5	68,3	1	0,89	3,9	4	0,16	0,156	683,34	643,89	600	6,39	6,57
		2	70,42	71,73	70,18	70,77	0,86	3,98	3,97	3,99	3,98	0,16	15	21,31	319,72	273,43			68,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	594,10			6,06	
		3	67,34	66,59	64,60	66,38	0,94	3,98	3,99	3,98	3,98	0,16	14	21,31	298,41	280,94			63,5	66,7	1	0,93	3,9	4	0,16	0,156	652,73			6,65	
	4%	1	64,40	64,60	64,20	64,40	0,98	4,00	3,99	4,00	4,00	0,16	16	21,31	341,04	333,36	299,77	600	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	792,59	720,26	600	8,08	7,35
		2	64,30	64,40	64,60	64,43	0,98	4,05	4,04	3,96	4,02	0,16	15	21,31	319,72	313,20			63,5	66,7	1	0,93	3,9	4,1	0,16	0,152	740,90			7,55	
		3	64,90	64,30	66,70	65,30	0,96	3,95	4,01	3,96	3,97	0,16	13	21,31	277,09	266,38			63,5	66,7	1	0,93	3,9	4,1	0,16	0,152	627,87			6,40	
	6%	1	62,80	63,40	63,60	63,27	1,01	4,02	4,02	4,02	4,02	0,16	15	21,31	319,72	321,59	290,17	600	63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	773,70	785,63	600	7,89	8,01
		2	57,70	58,40	57,60	57,90	1,17	3,99	3,97	3,98	3,98	0,16	15	21,31	319,72	271,25			57,2	60,3	1,19	1,00	3,8	3,9	0,164	0,16	993,18			10,13	
		3	67,70	67,80	67,40	67,63	0,87	3,95	3,97	3,96	3,96	0,16	14	21,31	298,41	258,74			74,6	76,2	0,78	0,76	3,8	4	0,164	0,156	932,03			8,04	
	8%	1	66,80	68,30	66,00	67,03	0,92	3,98	3,98	3,99	3,98	0,16	16	21,31	341,04	315,03	322,21	600	63,1	66,7	0,96	0,93	3,9	4	0,16	0,156	721,87	716,13	600	7,36	7,30
		2	65,40	65,50	65,10	65,67	0,95	3,98	3,97	3,98	3,98	0,16	14	21,31	298,41	282,24			63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	641,31			6,75	
		3	64,70	64,70	65,30	64,83	0,97	4,04	4,08	4,06	4,06	0,15	16	21,31	341,04	329,39			65,1	68,3	0,96	0,89	4	4,1	0,156	0,152	765,20			7,83	

Yogyakarta, November 2023
Peneliti

Muhammad Farhan A.A.
NIM : 21 511 012

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Mengetahui
Kalab. Laboratorium Teknik Sipil

Ir. Faisal Fathani, ASEAN Eng.
NIK : 21 511 0410

Lampiran 38 Pemeriksaan *IRS* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

PENGUJIAN IRS

Kadar Styrofoam		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Arloji Stability			Flow (mm)		Stability (kg)			Angka Koreksi			
															Tebal Sampel		Koreksi	
		1	2	3	rata2		awal	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX
0%	1	71,00	70,60	72,00	71,20	0,84	50	19,89	994,26	380		833,19			69,9	71,4	0,89	0,83
	2	70,40	71,00	70,20	70,53	0,86	48	19,89	954,49	390	3,85	825,32	830,10	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	3	69,90	69,20	69,60	69,57	0,89	47	19,89	934,60	385		831,80			68,3	69,9	0,89	0,89
2%	1	65,10	66,30	66,40	65,93	0,94	54	19,89	1073,80	350		1008,48			63,5	65,1	1	0,96
	2	67,00	67,80	67,30	67,37	0,91	57	19,89	1133,46	360	3,47	1035,22	1025,59	600	66,7	68,3	0,93	0,89
	3	66,30	67,00	64,80	66,033	0,94	55	19,89	1093,69	330		1033,08			63,5	66,7	1	0,93
4%	1	65,70	65,90	67,30	66,30	0,94	80	19,89	1590,82	230		1488,74			63,5	68,3	1	0,89
	2	69,20	67,70	69,10	68,67	0,88	82	19,89	1630,59	330	3,17	1436,27	1504,61	600	66,7	68,3	0,93	0,89
	3	65,90	66,10	66,50	66,17	0,94	85	19,89	1690,24	390		1588,83			65,1	66,7	0,96	0,93
6%	1	63,40	63,10	64,40	63,63	1,00	82	19,89	1630,59	370		1625,83			63,5	66,7	1	0,93
	2	68,00	68,90	66,80	67,90	0,90	84	19,89	1670,36	330	3,10	1501,23	1604,75	600	65,1	68,3	0,96	0,89
	3	64,10	65,70	65,00	64,93	0,96	88	19,89	1749,90	230		1687,19			63,5	65,1	1	0,96
8%	1	65,70	65,40	65,00	65,37	0,95	76	19,89	1511,28	355		1440,75			63,5	65,1	1	0,96
	2	58,00	57,50	58,70	58,07	1,16	74	19,89	1471,50	390	3,68	1706,64	1502,46	600	58,7	60,3	1,14	1,09
	3	66,50	66,50	66,00	66,33	0,94	73	19,89	1451,62	360		1359,99			65,1	66,7	0,96	0,93

Yogyakarta, November 2025

Diperiksa Oleh
Manajer Teknis Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bachtiar Ksohari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Fathan A.A.
NIM : 21 511 012

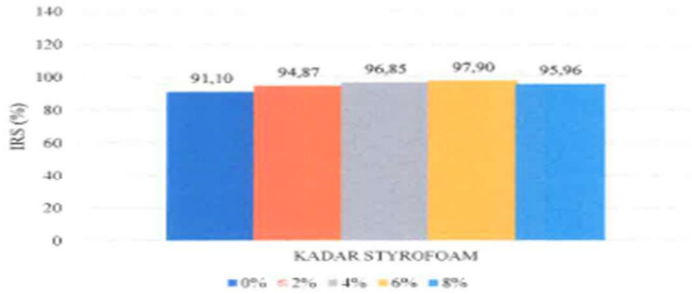
Lampiran 39 Grafik Hasil Pemeriksaan *IRS* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

REKAP IRS

NO	kadar	stabilitas 0.5 jam (kg)	stabilitas 24 jam (kg)	IRS %
1	0%	891,57	833,19	93,45
2		903,62	825,32	91,33
3		939,76	831,80	88,51
1	2%	983,48	1008,48	102,54
2		1033,92	1035,22	100,13
3		1260,88	1033,08	81,93
1	4%	1395,14	1488,74	106,71
2		1521,97	1436,27	94,37
3		1775,64	1588,83	89,48
1	6%	1521,97	1625,83	106,82
2		1775,64	1501,23	84,55
3		1648,81	1687,19	102,33
1	8%	1585,39	1440,75	90,88
2		1585,39	1706,64	107,65
3		1521,97	1359,99	89,36



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muhammad Fathan A.A.
NIM : 21 511 012

Lampiran 40 Pemeriksaan *TSR* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

PENGUJIAN TSR

Kadar Aspal	Kadar Styrofoam		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi Tebal				Angka Koreksi Diameter				ITS 24 JAM			REKAP	
																			Tebal Sampel		Koreksi		Tebal Sampel		Koreksi		Kpa				
			1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Mess	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2	MIN		
5,75%	0%	1	64,70	68,00	66,60	66,43	0,95	4,04	4,00	3,98	4,00	0,16	10	21,31	213,15	202,40	214,09	600	63,5	69,9	1	0,89	4	4,1	0,156	0,152	465,63	493,63	600	4,75	5,04
		2	65,70	64,60	65,50	65,27	0,96	3,98	3,98	3,98	3,98	0,16	12	21,31	255,78	244,48			63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	575,95			5,87	
		3	68,60	68,00	66,70	67,77	0,92	3,98	4,02	4,04	4,02	0,16	10	21,31	213,15	195,39			66,7	69,9	0,93	0,89	3,9	4	0,16	0,156	439,31			4,48	
	2%	1	65,40	66,90	65,70	66,00	0,94	4,00	4,04	4,04	4,03	0,15	11	21,31	234,46	220,47	233,59	600	65,1	68,3	0,96	0,89	3,9	4	0,16	0,156	507,59	548,37	600	5,18	5,59
		2	63,70	63,50	62,50	63,23	1,01	4,05	4,06	4,02	4,04	0,15	11	21,31	234,46	236,03			63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	564,88			5,76	
		3	65,90	65,20	65,00	65,37	0,96	4,00	3,99	3,99	3,99	0,16	12	21,31	255,78	244,27			65,1	66,7	0,96	0,93	3,9	4	0,16	0,156	572,65			5,84	
	4%	1	65,40	66,90	65,70	66,00	0,94	3,99	3,99	3,98	3,99	0,16	13	21,31	277,09	259,77	269,39	600	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	604,37	630,77	600	6,16	6,43
		2	66,20	66,50	66,70	66,47	0,93	3,99	4,00	4,00	4,00	0,16	14	21,31	298,41	278,82			65,1	66,7	0,96	0,93	3,9	4	0,16	0,156	642,19			6,55	
		3	66,90	66,20	65,20	66,10	0,94	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	14	21,31	298,41	279,01			63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	645,75			6,59	
	6%	1	64,50	64,90	63,80	64,40	0,97	4,04	4,03	4,05	4,04	0,15	14	21,31	298,41	290,39	288,34	600	65,1	66,7	0,96	0,93	4	4,1	0,156	0,152	682,63	697,63	600	6,96	7,12
		2	66,00	65,70	62,50	64,73	0,97	3,96	3,98	3,97	3,97	0,16	15	21,31	319,72	309,50			68,3	65,1	0,89	0,96	3,9	4	0,16	0,156	737,10			7,52	
		3	65,40	65,70	65,00	65,37	0,90	3,98	3,99	3,98	3,98	0,16	15	21,31	319,72	286,29			74,6	76,2	0,78	0,76	3,9	4	0,16	0,156	673,18			6,87	
	8%	1	64,20	64,00	64,30	64,17	0,98	3,98	3,97	3,99	3,98	0,16	14	21,31	298,41	293,43	279,51	600	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	703,36	614,42	600	7,17	6,27
		2	66,90	67,00	67,40	67,10	0,92	3,98	3,99	3,97	3,98	0,16	12	21,31	255,78	235,96			65,1	66,7	0,96	0,93	3,9	4	0,16	0,156	540,86			5,52	
		3	67,40	66,50	68,00	67,30	0,89	4,02	4,03	4,02	4,03	0,15	14	21,31	298,41	265,58			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	599,04			6,11	

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muhammad Farhan A.A.
NIM : 21 511 012

Mengetahui
Kaleb. Jalan Raya

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

Diperiksa Oleh
Dosen Jurusan Teknik Sipil

Ir. ASEAN Eng.
NIK : 21 511 101

Lampiran 41 Grafik Hasil Pemeriksaan *TSR* Gradasi *Superpave* Pen 60/70 dengan Penambahan *Styrofoam*

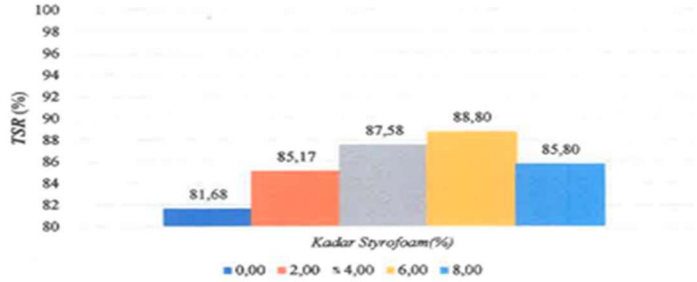
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

REKAP TSR

Kadar	STABILITAS 24 JAM (kg)	STABILITAS 0,5 JAM (kg)	TSR
0,00	493,63	604,33	81,68%
2,00	548,37	643,89	85,17%
4,00	630,77	720,26	87,58%
6,00	697,63	785,63	88,80%
8,00	614,42	716,13	85,80%



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2025
Peneliti

Muhammad Fathan A.A.
NIM : 21 511 012