TUGAS AKHIR

PERBANDINGAN KARAKTERISTIK CAMPURAN SUPERPAVE BERGRADASI ATAS DAN BERGRADASI TENGAH PADA BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

(COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF TOP-GRADED AND MID-GRADED SUPERPAVE MIXTURES OVER VARIOUS MIXING METHODS)

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

Ahmad Farhan Asrorunniam
20511444

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

2025

TUGAS AKHIR

PERBANDINGAN KARAKTERISTIK CAMPURAN SUPERPAVE BERGRADASI ATAS DAN BERGRADASI TENGAH PADA BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

(COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF TOP-GRADED AND MID-GRADED SUPERPAVE MIXTURES OVER VARIOUS MIXING METHODS)

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

Ahmad Farhan Asrorunniam
20511444

Disetujui :

Pembimbing

Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
Tanggal : 11 September 2025

Dipindai dengan CamScanner

TUGAS AKHIR

PERBANDINGAN KARAKTERISTIK CAMPURAN SUPERPAVE BERGRADASI ATAS DAN BERGRADASI TENGAH PADA BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

(COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF TOP-GRADED AND MID-GRADED SUPERPAVE MIXTURES OVER VARIOUS MIXING METHODS)

Disusun Oleh

Ahmad Farhan Asrorunniam
20511444

Telah diterima sebagai salah satu persayatan
Untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Ir.Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.	Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc.
NIK : 215111307	NIK : 185111304	NIK : 205111303

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

16/9/2025

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa laporan Tugas Akhir ini, yang saya susun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, adalah hasil karya saya sendiri. Bagian-bagian tertentu yang bersumber dari karya orang lain telah saya cantumkan referensinya secara jelas, sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa seluruh atau sebagian laporan ini bukan merupakan hasil karya saya sendiri atau terdapat indikasi plagiarisme, saya bersedia menerima konsekuensi, termasuk kemungkinan pencabutan gelar akademik sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 16 Sep 2025

Yang membuat pernyataan,



Ahmad Farhan Asrorunniam

(20511444)

Dipindai dengan CamScanner

DEDIKASI

Alhamdulillahirabbilalamin

"saya ucapkan atas dukungan dan Do'a dari orang-orang tercinta,
akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
Oleh karena itu dengan rasa syukur dan bahagia
saya persembahkan dan terimakasih kepada:
Allah SWT
Karena hanya atas izin dan karunia-Nya maka skripsi ini
dapat dibuat dan selesai tepat pada waktunya. Puji syukur yang tak
terhingga pada Allah SWT yang telah meridhoi dan mengabulkan segala doa"

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan atas kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul *Perbandingan Karakteristik Campuran Superpave Bergradasi Atas dan Bergradasi Tengah Pada Berbagai Metode Pencampuran (Comparasion Of Characteristics Of Top-Grade And Mid-Grade Superpave Mixtures Over Various Mixing Method)* dapat terselesaikan dengan baik. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

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

1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa membimbing dan memberikan arahan kepada penulis selama penyusunan Tugas Akhir ini
2. Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc. dan Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberi masukan dan saran kepada penulis.
3. 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.
4. Bapak Pranoto, Bapak Sukamto dan Mas Giri Widhiatmoko selaku laboran Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan yang telah banyak membantu penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir.

5. Humnah Rizqi Apriliyanti S.T. selaku partner laboratorium penulis yang telah banyak membantu serta memberikan semangat kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir.
6. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis memohon maaf serta mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 2025

Penulis,

Ahmad Farhan Asrorunniam

(20511444)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
DEDIKASI v
KATA PENGANTAR vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR TABEL xiii
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR LAMPIRAN xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xvi
ABSTRAK xvii
ABSTRACT xviii
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 Batas Penelitian 4
BAB II STUDI PUSTAKA 7
2.1 Tinjauan Umum 7
2.2 Kinerja Perkerasan Aspal *Superpave* 7
2.3 Kinerja Perkerasan Aspal dengan Berbagai Metode Pencampuran 8
2.4 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang 9
BAB III LANDASAN TEORI 12
3.1 Perkerasan Jalan 12
3.1.2 Agregat 13
3.2 *Superpave Asphalt* 16
3.3 Campuran *Superpave* 18

3.4 Karakteristik *Marshall Standard* 19
3.4.1 Stabilitas (*Stability*) 19
3.4.2 Kelelehan (*Flow*) 19
3.4.3 *Void in the Total Mix* (*VITM*) 20
3.4.4 *Marshall Quotient (MQ)* 20
3.4.5 Kepadatan (*Density*) 21
3.4.6 *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*) 22
3.8.7 *Void in Mineral Agregate* (*VMA*) 22
3.5 *Indirect Tensile Strength (ITS)* 23
3.6 *Index of Retained Strength* (*IRS*) 23
3.7 *Cantabro Loss* 24
3.8 Pengaruh Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Perkerasan 24
3.8.1 Metode Pencampuran Konvensional 25
3.8.2 Metode Pencampuran Dua Tahap 25
3.8.2 Metode Pencampuran Tiga Tahap 26
BAB IV METODE PENELITIAN 28
4.1 Metode Penelitian 28
4.2 Metode Pengambilan Sampel 28
4.3 Metode Pengambilan Sampel 28
4.4 Tahapan Penelitian 29
4.5 Langkah-Langkah Penelitian 30
4.6 Peralatan Penelitian 30
4.7 Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Perkerasan 36
4.7.1 Metode Pencampuran Konvensional 37
4.7.2 Metode Pencampuran Dua Tahap 37
4.7.3 Metode Pencampuran Tiga Tahap 38
4.8 Variasi dan Jumlah Sampel Penelitian 38
4.9 Bagan Alir Penelitian 39
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 41
5.1 Hasil Penelitian 41
5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat 41

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 42
5.1.3 Hasil Pengujian Menentukan Kadar Aspal Optimum Campuran *Superpave* 42
5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Superpave* Berdasarkan Jenis Gradasi dengan Bahan Ikat Pen 60/70 pada KAO 44
5.2 Pembahasan 46
5.2.1 Karakteristik Agregat Kasar 46
5.2.2 Karakteristik Agregat Halus 46
5.2.3 Karakteristik Aspal 47
5.2.4 Karakteristik *Marshall* Campuran *Superpave* dengan Bahan Ikat Pen 60/70 untuk Mencari KAO pada Berbagai Jenis Gradasi 48
5.2.5 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Kinerja Campuran *Superpave* pada KAO berdasarkan Jenis Gradasi 57
5.2.6 Perbandingan Nilai *IRS* Campuran *Superpave* Terhadap Berbagai Metode Pencampuran berdasarkan Jenis Gradasi 68
5.2.7 Perbandingan Nilai *ITS* Campuran *Superpave* Terhadap Berbagai Metode Pencampuran berdasarkan Jenis Gradasi 70
5.2.8 Perbandingan Nilai *CL* Campuran *Superpave* Terhadap Berbagai Metode Pencampuran berdasarkan Jenis Gradasi 71
5.2.9 Rekapitulasi Perbandingan Hasil Pengujian Karakteristik Keseluruhan Campuran 73
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 79
6.1 Pembahasan 79
6.2 Saran 79
DAFTAR PUSTAKA 81
LAMPIRAN 86

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang 10
Tabel 3.1 Persyaratan Aspal Penetrasi 60/70 13
Tabel 3.2 Persyaratan Agregat Kasar 14
Tabel 3.2 Persyaratan Agregat Halus 14
Tabel 3.4 Spesifikasi *Superpave* 19
Tabel 4.1 Gradasi Agregat Campuran *Superpave* 31
Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 4,5% 32
Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 5% 33
Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 5,5% 33
Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 6% 34
Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 6,5% 34
Tabel 4.7 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 5% 35
Tabel 4.8 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 5,5 % 35
Tabel 4.9 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 6% 36
Tabel 4.10 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 6,5% 36
Tabel 4.11 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 7% 37
Tabel 4.12 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO 39
Tabel 4.13 Jumlah Benda Uji Pada Kondisi KAO 39
Tabel 5.1 Hasil Pengujian Agregat Kasar 41
Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Halus 41
Tabel 5.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Filler 41
Tabel 5.4 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 42
Tabel 5.5 Hasil Pengujian Menentukan KAO Campuran *Superpave* Gradasi Tengah 42
Tabel 5.6 Hasil Pengujian Penentuan KAO Campuran *Superpave* Gradasi Atas 43
Tabel 5.7 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Standard pada Campuran *Superpave* Gradasi Tengah 44

Tabel 5.8 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall Standard* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas 45
Tabel 5.9 Rekapitulasi Hasil Pengujian *IRS* pada Setiap Jenis Gradasi 45
Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Pengujian *ITS* pada Setiap Jenis Gradasi 45
Tabel 5.11 Rekapitulasi Hasil Pengujian *CL* pada Setiap jenis Gradasi 45
Tabel 5.12 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik pada Campuran Superpave Batas Atas dan Batas Tengah 73
Tabel 5.13 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik pada Campuran Superpave Batas Atas dan Batas Tengah 74
Tabel 5.14 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Atas dengan Berbagai Metode Pencampuran 74
Tabel 5.15 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Tengah dengan Berbagai Metode Pencampuran 76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Konvensional 25
Gambar 3.2 Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Dua Tahap 26
Gambar 3.3 Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Tiga Tahap 27
Gambar 4.1 Rencana Gradasi Agregat Campuran *Superpave* 31
Gambar 4.2 *Flowchart* Penelitian 40
Gambar 5.1 Penentuan Kadar Aspal Optimum Campuran *Superpave* Gradasi Tengah 43
Gambar 5.2 Penentuan Kadar Aspal Optimum Campuran *Superpave* Gradasi Atas 44
Gambar 5.3 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas Campuran *Superpave* 49
Gambar 5.4 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow* Campuran *Superpave* 50
Gambar 5.5 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *MQ* Campuran *Superpave* 51
Gambar 5.6 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM* Campuran *Superpave* 53
Gambar 5.7 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VFWA* Campuran *Superpave* 54
Gambar 5.8 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VMA* Campuran *Superpave* 55
Gambar 5.9 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Density* Campuran *Superpave* 56
Gambar 5.10 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai Stabilitas pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 57
Gambar 5.11 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *Flow* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 59

Gambar 5.12 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *MQ* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 60
Gambar 5.13 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VITM pada Campuran Superpave Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 62
Gambar 5.14 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *VFWA* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 64
Gambar 5.15 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *VMA* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 65
Gambar 5.16 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *Density* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 67
Gambar 5.17 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *IRS* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 68
Gambar 5.18 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *ITS* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah 70
Gambar 5.19 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *CL* pada Campuran *Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Bawah 71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 79
Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 80
Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70 81
Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 82
Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 83
Lampiran 6 Pemeriksaan Kelarutan Aspal dalam *TCE* 84
Lampiran 7 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar 85
Lampiran 8 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal 86
Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin *Loss Angeles* 87
Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus 88
Lampiran 11 *Sand Equivalent* 89
Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Debu* 90
Lampiran 13 Hasil *Marshall Superpave* Gradasi Tengah 91
Lampiran 14 Hasil *Marshall Superpave* Gradasi Atas 92
Lampiran 15 Rekapitulasi Hasil *Marshall Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Atas 93
Lampiran 16 Hasil *Marshall Superpave* Gradasi Tengah Setelah KAO 94
Lampiran 17 Hasil *Marshall Superpave* Gradasi Atas Setelah KAO 95
Lampiran 18 Hasil *Cantabro Loss Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Atas Setelah KAO 96
Lampiran 20 Hasil Pengujian *ITS Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Atas Setelah KAO 97
Lampiran 21 Hasil Pengujian *IRS Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Atas Setelah KAO 98
Lampiran 22 Hasil Pengujian *IRS Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Atas Setelah KAO 99

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

CL = *Cantabro Loss*

cm = Centimeter

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

G_{mb} = Berat jenis *bulk* dari campuran aspal yang telah dipadatkan

IRS = *Index of Retained Strength*

ITS = *Indirect Tensile Strength*

KAO = Kadar Aspal Optimum

kg = Kilogram

kg/mm = Kilogram per millimeter

LA = *Loss Angeles*

m = Meter

mm = Millimeter

MQ = *Marshall Quotient*

M_o = Berat sebelum diabrasi (gr)

M_i = Berat setelah diabrasi (gr)

SHRP = *Strategic Highway Research Program*

SNI = *Standar Nasional Indonesia*

TCE = *Trychloroethylene*

VITM = *Void In The Total Mix*

VFWA = *Void Filled With Asphalt*

VMA = *Void In Mineral Aggregate*

ABSTRAK

Gradasi *Superpave* telah menjadi acuan dalam perancangan campuran aspal pada proyek pembangunan jalan modern. Sistem gradasi ini dirancang untuk mengoptimalkan kinerja dan memperpanjang umur layanan perkerasan dengan mempertimbangkan variasi kondisi lingkungan serta beban lalu lintas. Komposisi gradasi agregat memegang peranan krusial dalam proses pencampuran *Superpave*, karena memengaruhi kualitas mekanis campuran aspal, termasuk stabilitas, ketahanan terhadap aus, dan resistansi terhadap retak. Pemilihan jenis gradasi, beserta proporsi agregat kasar dan halus terhadap total berat campuran, akan berpengaruh langsung pada kekuatan, stabilitas, serta daya tahan campuran aspal terhadap kerusakan akibat deformasi plastis maupun retak lelah.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik Marshall, sifat volumetrik, dan ketahanan campuran *Superpave*. Tiga metode pencampuran digunakan, yaitu metode konvensional, bertahap 2, dan bertahap 3, dengan dua jenis gradasi agregat (gradasi atas dan gradasi tengah). Pengujian meliputi parameter Marshall Standard (MS) yang terdiri dari *stability*, *flow*, dan *Marshall Quotient*, sifat volumetrik (VITM, VMA, dan VFWA), serta ketahanan terhadap kelembaban (*Index of Retained Strength*) dan kekuatan tarik tidak langsung (*Indirect Tensile Strength*).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode bertahap 3 pada gradasi atas memberikan kinerja terbaik dengan nilai *stability* 1.520 kg dengan persen selisih 2,08% terhadap metode konvensional, *flow* 3,17 mm dengan persen selisih penurunan sebesar 3,94%, MQ 479,51 kg/mm dengan persen selisish kenaikan dari metode konvensional sebesar 5,93%, VITM 3,01% dengan persen penurunan sebesar 4,65% terhadap metode konvensional, VFWA 82,61% dengan persen selisih kenaikan sebesar 0,82% dari metode konvensional, IRS 94,52% dengan persen selisih kenaikan 3,28%, ITS 22,03 kg/cm² dengan persen selisih kenaikan sebesar 12,13%, dan CL 2,68% dengan persen selisih penurunan sebesar 40,46% dari metode konvensioanal, yang seluruhnya memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Penerapan metode bertahap 3 direkomendasikan untuk meningkatkan kinerja struktural dan durabilitas perkerasan jalan pada lalu lintas berintensitas tinggi.

Kata kunci: *Superpave*, Gradasi atas, Gradasi tengah, *Marshall*, *Index of Retained Strength*, *Indirect of Tensile Strength*, *Cantabro Loss*

ABSTRACT

Superpave gradation has become a reference in the design of asphalt mixtures in modern road construction projects. This grading system is designed to optimize performance and extend the service life of the pavement by taking into account variations in environmental conditions as well as traffic loads. The composition of aggregate gradations plays a crucial role in the Superpave mixing process, as it affects the mechanical qualities of asphalt mixtures, including stability, wear resistance, and resistance to cracking. The selection of gradation type, along with the proportion of coarse and fine aggregates to the total weight of the mixture, will have a direct effect on the strength, stability, and durability of the asphalt mixture against damage due to plastic deformation and fatigue cracking.

This study aims to analyze the effect of mixing method variations on Marshall characteristics, volumetric properties, and resistance to Superpave mixtures. Three mixing methods are used, namely the conventional, stage 2, and stage 3 methods, with two types of aggregate gradation (upper gradation and middle gradation). The tests include Marshall parameters (stability, flow, and Marshall Quotient), volumetric properties (VITM, VMA, and VFWA), and moisture resistance (Index of Retained Strength) and indirect tensile strength.

The results showed that the 3-stage method at the upper gradation provided the best performance with a stability value of 1,520 kg with a percentage difference of 2.08% compared to the conventional method, flow of 3.17 mm with a percentage difference of 3.94%, MQ of 479.51 kg/mm with a percentage increase from the conventional method of 5.93%, VITM of 3.01% with a percentage decrease of 4.65% compared to the conventional method, VFWA is 82.61% with a percentage increase difference of 0.82% from the conventional method, IRS is 94.52% with a percentage increase difference of 3.28%, ITS is 22.03 kg/cm² with a percentage difference in increase of 12.13%, and CL is 2.68% with a percentage difference of 40.46% from the conventional method, all of which meet the specifications of Bina Marga 2018. The application of the 3-stage method is recommended to improve the structural performance and durability of road pavement in high-intensity traffic.

Keywords*: Superpave, Middle gradation, Top gradation, Marshall, Index of Retained Strength, Indirect of Tensile Strength, Cantabro Loss*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagian besar konstruksi jalan yang dibangun di Indonesia menggunakan perkerasan lentur, atau struktur beton aspal. Perkerasan lentur adalah jenis struktur yang biasa digunakan dalam proyek konstruksi oleh PUPR di berbagai daerah di Indonesia. Indonesia merupakan negara dengan iklim, cuaca, budaya dan pariwisata yang berbeda-beda, dan dengan bertambahnya jumlah penduduk yang tinggal di Indonesia maka volume lalu lintas akan meningkat sehingga kerusakan jalan akan lebih cepat terjadi. Sekalipun perkerasan direncanakan dan dibangun dengan hati-hati di lokasi, kerusakan dapat terjadi akibat beban dinamis berulang yang dialami perkerasan tersebut. Gradasi *Superpave* merupakan sistem perancangan gradasi agregat yang dikembangkan oleh Federal Highway Administration (FHWA) untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan, termasuk peningkatan kekuatan berupa ketahanan terhadap berbagai kondisi lalu lintas dan iklim, hasil ini telah dibuktikan pada beberapa penelitian yang diantaranya dilakukan oleh Al-Khateeb, dkk (2017), Karahancer (2018), Zumrawi dan Edrees (2019), serta Hadi dan Fauziah (2022).

Superpave adalah salah satu jenis gradasi yang bisa diadopsi di Indonesia. Penggunaan dan implementasi tipe gradasi ini telah mengalami perkembangan pesat di Amerika. Campuran *Superpave* merupakan gradasi campuran beton aspaI yang dikembangkan oleh *Strategic Highway Research Program (SHRP).* Perkerasan jenis *Superpave* sangat efektif bila digunakan di negara-negara dengan iklim ektrem, karena dapat mencegah penurunan kinerja akibat kondisi ekstrem Zumwari (2019). Produk dari Program Penelitian Jalan Raya AS (*SHRP*), perkerasan aspal berkualitas tinggi (*Superpave*) dikembangkan antara tahun 1987 dan 1992 untuk mengatasi kerusakan jalan raya, retak Lelah dan retak termal. *Superpave* telah diadopsi oleh lapangan terbang karena keunggulan penghematan biaya dan kualitas yang baik. Sistem *Superpave* terdiri dari Evaluasi Pengikat

Aspal, Desain Campuran Aspal, dan Evaluasi Kinerja Campuran Aspal (Tutu dkk., 2022).

Campuran *Superpave* dapat menjadi solusi permasalahan yang timbul pada pemuatan dan perendaman akibat munculnya genangan air payau di lapangan. Hal ini disebabkan oleh kemampuan *Superpave* dalam menjaga ikatan yang erat antar agregat sehingga perkerasan mampu memberikan kekuatan lebih baik dengan menerima beban vertikal dan perendaman dalam janga waktu tertentu Hadi dan Fauziah, (2019). Selain menggunakan bahan tambahan, metode pencampuran menjadi salah satu alternatif yang patut dipertimbangkan untuk meningkatkan performa campuran. Saat ini, metode baru dalam pencampuran beton aspal sedang diperkenalkan yaitu metode pencampuran bertahap, pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas campuran aspal beton dengan mengubah proses pencampuran aspal dan agregat.

Menurut Iqbal dan Fauziah (2023), metode pencampuran bertahap terbukti menghasilkan nilai *Asphalt Flow Down* yang lebih rendah dibandingkan pencampuran konvensional. Selain itu, penerapan pencampuran dua tahap maupun tiga tahap mampu menghasilkan campuran yang lebih homogen sehingga dapat meminimalkan risiko terjadinya segregasi aspal. Menurut Kok dan Kuloglu (2011), mengatakan metode pencampuran bertahap ini melibatkan tahap-tahap awal, seperti *pre-coating* agregat kasar dengan kadar aspal optimum, kemudian mencampurnya dengan *filler* dan agregat halus. Tujuannya adalah untuk meningkatkan daya retak antara aspal dan agregat, mengurangi risiko pemisahan agregat akibat kelembapan, serta mencegah terbentuknya debu dan kontamainan yang dapat mempengaruhi kualitas campuran aspal.

Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini akan mengkaji dampak dari penggunaan gradasi atas dan gradasi tengah dengan metode campuran konvensional, 2 tahap dan 3 tahap terhadap karakteristik campuran *Superpave*. Penelitian ini akan membandingkan antara penggunaan jenis gradasi atas dan tengah dengan berbagai metode pencampuran menggunakan pengujian diantaranya adalah *MS, ITS, IRS,* dan *CL.*

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensianal, 2 tahap dan bertahap 3 terhadap karakteristik *Marshall* campuran *Superpave* gradasi atas dan gradasi tengah ?
2. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional, 2 tahap dan bertahap 3 terhadap karakteristik *Indirect Tensile Strenght (ITS)* campuran *Superpave* bergaradasi atas dan bergradasi tengah ?
3. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional, 2 tahap dan bertahap 3 terhadap karakteristik *Index of Retained Strength (IRS)* campuran *Superpave* bergradasi atas dan bergradasi tengah ?
4. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional, 2 tahap dan bertahap 3 terhadap nilai *Cantabro Loss (CL)* campuran *Superpvae* bergradasi atas dan bergradasi tengah ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai Karakteristik *Marshall* dengan agregat bergradasi atas dan bergradasi tengah campuran *Superpave.*
2. Mengidentifikasi pengaruh metode pencampuran konvensional, 2 tahap dan bertahap 3 terhadap nilai *Indirect Tensile Strenght* campuran *Superpave* bergradasi atas dan bergradasi tengah.
3. Mengidentifikasi pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *Index of Retained Strength* dengan agregat bergradasi atas dan bergradasi tengah campuran *Superpave.*
4. Mengidentifikasi pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap *Cantabro Loss* dengan agregat bergradasi atas dan bergradasi tengah *Superpave.*

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai bahan pertimbangan dalam pemilihan campuran Superpave dengan gradasi atas maupun tengah melalui penerapan tiga metode pencampuran. Hasilnya diharapkan mampu menunjukkan perbandingan serta besarnya pengaruh masing-masing metode pencampuran terhadap kekuatan perkerasan Superpave, sehingga dapat dijadikan acuan dalam menentukan metode pencampuran yang paling optimal..

1.5 Batas Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pencampuran yang dilakukan menggunakan metode konvensional, 2 tahap, dan 3 tahap.
2. Gradasi yang dipakai yaitu gradasi atas dan gradasi tengah campuran *Superpave.*
3. Pengujian karakteristik campuran *Superpave* terdiri dari *Marshall Test, Indirect Tensile Strength (ITS), Index of Retained Strength (IRS), Cantabro Loss (CL),* dan campuran dengan bahan ikat pen 60/70.
4. Pengujian IRS menggunakan penerapan rendaman dengan durasi 0,5 jam.
5. Bahan ikat yang digunakan yaitu aspal penetrasi 60/70 dan tidak meninjau reaksi kimianya
6. Campuran KAO pada gradasi atas 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% dan KAO yang digunakan pada gradasi tengah 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%.
7. Variasi metode pencampuran yang dilakukan sebagai berikut metode 1 yaitu metode konvensional, metode pencampuran 2 tahap dan metode pencampuran 3 tahap
8. Penelitian dilakukan di Laboratorium Perkerasan Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

BAB II
STUDI PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Tujuan meninjau penelitian yang telah lalu adalah untuk mengetahui apa yang relevan atau berkaitan dengan penelitian yang akan saya lakukan. Tinjauan pustaaka ini memungkinkan penulis untuk membandingkan subjek penelitian sebelumnya.

2.2 Kinerja Perkerasan Aspal *Superpave*

Menurut Al-Khateeb, dkk (2017) dalam penelitiannya Dijelaskan bahwa adanya zona gradasi larangan pada campuran Superpave berfungsi untuk menghasilkan volume rongga yang lebih besar, sehingga aspal yang ditambahkan dapat mengisi rongga tersebut secara optimal.. Menurut Khosla (2014) dalam jurnal berjudul *A Performance-Based Evaluation of Superpave Design Gyrations for High Traffic Surface Mixes* menyatakan bahwa. Metode *Superpave* mengikuti pendekatan volumetric yang memilih kemiringan agregat dan kadar aspal optimal dengan menganalisis kandungan rongga dan sifat volumetrik lainnya dari campuran. Derajat putaran ditentukan oleh total volume lalu lintas, yang dinyatakan sebagai beban uniaksial ekivalen (ESAL), yang diperkirakan terjadi selama perkiraan umur jalan. Menurut Fauziah dan Hadi (2019), campuran *Superpave* dapat menjadi solusi permasalahan akibat pembebanan atau perendaman yang terjadi dilapangan. Faktanya, campuran *Superpave* menciptakan ikatan yang erat antar agregat, sehingga lapisan yang dihasilkan akan lebih tahan terhadap beban vertikal dan lebih tahan terhadap perendaman waktu tertentu.

Menurut Hadi dan Fauziah (2022), dalam penilitannya studi komparasi prediksi umur pelayanan antara campuran *Superpave* dan *AC-WC* menggunakan permodelan viskoelastik dan elastik, tinggi nilai Smix pada campuran *Superpave* menunjukkan kemampuan campuran tersebut dalam menahan distribusi beban campuran pada perkerasan dan Kembali kebentuk semula dibandingkan dengan

campuran bergradasi *AC-WC*. *Smix* merupakan efek dari rendahnya nilai VMA yang terdapat pada campuran *Superpave*.

2.3 Kinerja Perkerasan Aspal dengan Berbagai Metode Pencampuran

Menurut Yaro (2021), Penggunaan metode pencampuran bertahap dianggap lebih tepat karena metode ini mampu menghasilkan campuran yang memiliki stabilitas tinggi sekaligus ketahanan terhadap kelembaban yang lebih baik. Menurut Iqbal dan Fauziah (2023) menyatakan bahwa, Penerapan metode pencampuran bertahap menunjukkan peningkatan nilai TSR dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu, penambahan serbuk ban karet dapat menurunkan nilai *Cantabro Loss*, yang menandakan kemampuan material tersebut dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap kehilangan massa akibat keausan.

Penggunaan metode pencampuran dua tahap pada campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) dengan bahan pengikat aspal Pen 60/70 serta aspal Crumb Rubber terbukti memberikan pengaruh positif terhadap kinerjanya. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa pencampuran dua tahap dapat dijadikan alternatif yang lebih efektif dalam meningkatkan mutu dan performa campuran SMA. Pada pengujian Marshall, perendaman, kekuatan tarik tidak langsung, maupun rasio kekuatan tarik, metode pencampuran dua tahap memberikan nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional. (Hidayat, 2021). Manurut Hasemi, dkk (2015), Penelitian ini menganalisis pengaruh urutan pencampuran terhadap kinerja campuran aspal dengan tujuan mengaitkan susunan pencampuran terhadap workability serta sifat mekanis campuran. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa perubahan urutan pencampuran menghasilkan campuran yang lebih kaku, terlihat dari peningkatan nilai modulus elastisitas. Modulus elastisitas yang dicapai tercatat 14% lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional, sementara kekuatan tariknya mengalami peningkatan signifikan hingga 45% dibandingkan campuran konvensional.

Menurut Iqbal dan Fauziah (2023), tentang Penggunaan Bahan Tambah dengan Metode Pencampuran Bertahap terhadap Kinerja Campuran *HRS-WC*, Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban karet pada

campuran HRS-WC dapat menurunkan nilai CL, baik pada metode pencampuran konvensional maupun bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa serbuk ban karet berperan dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap kehilangan massa akibat keausan.

2.4 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Perbandingan penelitian penulis dengan penelitian sebelumnya yang sejenis dapat dilihat pada Tabel 2.1 dihalaman selanjutnya.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Penelitian Terdahulu								Penelitian yang dilakukan
No	Aspek	Zhang dkk (2004)	Kok dan Kuloglu (2011)	Al-Khateeb dkk, (2017)	Wahyudi (2019)	Hadi dkk, (2021)	Mojtaba dan Hasan (2023)	**Asrorunniam (2025)**
1.	Judul	*Effect of Superpave defined restricted zone on hot-mix asphalt performance*	*Effects of two phase mixing method on mechanical properties of hot mix asphalt*	*Effect of Superpave restricted zone on volumetric and compaction properties of asphalt mixtures*	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Campuran *Superpave* dan Aspal Porus	Studi Komparasi Karakteristik Campuran dan Prediksi Umur Pelayanan Antara Perkerasan *Superpave* dengan *ACWC* Akibat Pengaruh Jenis Bahan Ikat Aspal Starbit E-55 dan Pen 60/70	*The effect of mix design method on performance of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and recycling agents: Superpave versus balanced mix design*	Perbandingan karakteristik campuran superpave bergradasi atas dan bergradasi tengah pada dua metode pencampuran
2.	Jenis Campuran	*Superpave*	*Superpave*	*Superpave*	*Superpave dan* Aspal Porus	*Superpave* dan *AC-WC*	Superpave and balanced mix design	Superpave
3.	JenisAspal	PG64-22	Pen 60/70	*Aspalt 60/70 Penetration*	Pen 60/70	Starbit E-55 dan Pen 60/70	Asphalt PEN 60/70 and RAP	Penetrasi 60/70
4.	Metode Pencampuran	Konvensional	Metode Konvensional dan Tiga Tahap	*Konvensional*	Konvensional	Konvensional, 2 tahap, 3 tahap	konvensional	Konvensional dan 3 tahap

Sumber : (Fauziah dan Handaka, 2017; Al-Khateeb dkk, 2017; Wahyudi, 2019; Hadi dkk, 2021; Iqbal dan Fauziah, 2023; Mojtaba dan Hasan, 2023)

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Penelitian Terdahulu								**Penelitian yang dilakukan**
No	Aspek	Zhang dkk (2004)	Kok dan Kuloglu (2011)	Al-Khateeb dkk, (2017)	Wahyudi (2019)	Hadi dkk, (2021)	Mojtaba dan Hasan (2023)	**Asrorunniam (2025)**
5.	Pengujian	*Marshall Standard, APA Rut Test*	*Marshall, IRS, ITS,* IDT dan *CL.*	*MQ*	*MQ, IRS, ITS,* Permeabilitas, dan *Cantabro Test*	*MQ, IRS, ITS, TSR, CantabroTest, Stiffness Modulus* dan Prediksi Umur Pelayanan (menggunakan program *KENPAVE*)	*ITS,HWT,dan I-FIT*	*MQ, IRS, ITS, CantabroTest*
6.	Hasil	Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran yang memiliki gradasi yang melanggar zona terlarang (gradasi tengah) memiliki kinerja yang lebih baik daripada campuran dengan gradasi yang melewati luar zona terbatas.	Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan metode bertahap secara keseluruhan memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional	Penelitian menunjukkan bahwa zona gradasi larangan pada campuran Superpave berfungsi menciptakan rongga yang lebih besar sehingga aspal dapat mengisinya secara optimal. Pada campuran dengan NMAS 9,5 mm, nilai VMA pada campuran ARZ tercatat lebih tinggi dibandingkan dengan campuran BRZ.	Campuran Superpave yang dibuat dengan metode pencampuran bertahap (dua tahap dan tiga tahap) cenderung menghasilkan nilai Cantabro Loss lebih rendah dibandingkan metode konvensional (satu tahap). Namun, pada campuran aspal porus, penggunaan metode dua tahap maupun tiga tahap justru menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode satu tahap.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran perkerasan dengan gradasi Superpave, pada berbagai jenis bahan pengikat, memiliki keunggulan dibandingkan perkerasan bergradasi AC-WC, terlihat dari nilai Stabilitas, MQ, IRS, ITS, TSR, CL, Modulus Stiffness, serta perkiraan umur layanan perkerasan yang lebih tinggi.	Hasil pengujian HWT dan ITS menunjukkan seluruh campuran yang dibuat menggunakan OBC yang diperkirakan dengan metode SMD dapat lolos rutting (RD @ 20.000 lolos≤12,5 mm) dan kerentanan terhadap kelembaban (TSR≥kriteria 80%) sedangkan tidak memenuhi persyaratan ketahanan retak (FI≥5), kecuali campuran kontrol (yaitu, C).	Metode bertahap 3 pada gradasi atas menunjukkan kinerja terbaik dengan stability 1.520 kg (+2,08%), flow 3,17 mm (–3,94%), MQ 479,51 kg/mm (+5,93%), VITM 3,01% (–4,65%), VFWA 82,61% (+0,82%), IRS 94,52% (+3,28%), ITS 22,03 kg/cm² (+12,13%), dan CL 2,68% (–40,46%) dibanding metode konvensional. Seluruh parameter tersebut masih memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018.

Sumber : (Fauziah dan Handaka, 2017; Al-Khateeb dkk, 2017; Wahyudi, 2019; Hadi dkk, 2021; Iqbal dan Fauziah, 2023; Mojtaba dan Hasan, 2023)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan mengandung sejumlah bahan penyusunannya. Bahan penyusunnya ada dua macam, yaitu bahan dasar utama berupa kerikil, pasir, Bahan-bahan seperti batu pecah dan sejenisnya digunakan bersama dengan bahan pengikat seperti aspal, semen Portland, tanah liat, dan kapur. Secara khusus, pemilihan bahan pengikat dapat disesuaikan dengan tipe perkerasan yang akan diterapkan.

3.1.1 Aspal

Aspal adalah bentuk minyak bumi yang lengket, berwarna hitam, sangat kental, cair atau semi padat. Proses tersebut dapat ditemukan pada sedimen alami atau mungkin pada produk olahan yang diklasifikasikan sebagai bitumen. Aspal adalah bahan mirip minyak bumi berwarna hitam atau coklat yang konsistensinya bervariasi dari cairan kental hingga padatan seperti kaca. Aspal terdiri dari senyawa yang berhubungan dengan hydrogen dan karbon dengan sedikit nitrogen, sulfur dan oksigen. Aspal alami diyakini terbentuk pada tahap awal penguraian sedimen organik laut menjadi minyak bumi, dicirikan oleh kandungan mineralnya, tidak seperti sisa gula minyak bumi *plastic*.

Pada umumnya aspal yang digunakan untuk permukaan jalan adalah aspal berbahan dasar minyak bumi, namun banyak dilakukan modifikasi pada aspal tersebut, salah satu hasil modifikasi tersebut adalah PG-70. Aspal ini merupakan produk aspal modifikasi polimer. Menurut Afriyanto, dkk (2019) Aspal yang dimodifikasi dengan resin LDPE menurunkan nilai penetrasi aspal, kepadatan aspal, plastisitas aspal, titik nyala aspal dan titik bakar, viskositas aspal serta meningkatkan titik lembek aspal. Hal ini membuat aspal menjadi lebih keras dan tahan terhadap suhu yang lebih tinggi, sehingga tidak mudah berubah bentuk (deformasi).

Pada umumnya jenis aspal yang sering digunakan yaitu jenis aspal minyak,

salah satunya yaitu aspal penetrasi 60/70. Berdasarkan ketentuan Bina Marga (2018) terdapat syarat yang harus dipenuhi untuk aspal AC 60/70, berikut Tabel 3.1 Persyaratan Aspal Pen 60/70.

Tabel 3.1 Persyaratan Aspal Penetrasi 60/70

No	Nilai Persyaratan	Standar	Jenis Pengujian
1	≥ 1,0	SNI-06-2441-1991	Berat jenis
2	60-70	SNI-06-2456-1991	Penetrasi pada 25º
3	≥ 100	SNI-06-2432-1991	Daktilitas pada 25º
4	≥ 232	SNI-06-2433-1991	Titik nyala (ºC)
5	≥ 48	SNI-06-2434-1991	Titik lembek (ºC)
6	≥ 99	*ASTM* D5546	Kelarutan dalam TCE (%)

Sumber : Bina Marga (2018)

3.1.2 Agregat

Agregat merupakan sekumpulan fragmen batuan, kerikil, pasir, maupun mineral lain yang dapat berasal dari alam ataupun hasil buatan. Material ini berperan penting dalam menentukan kemampuan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas serta ketahanannya terhadap pengaruh cuaca. Pada umumnya, campuran aspal tersusun dari agregat dengan proporsi sekitar 75%–80% dari volume campuran atau 90%–95% dari berat campuran, sehingga sangat berpengaruh terhadap sifat dan kinerja perkerasan. Untuk memperoleh campuran aspal yang ideal, agregat harus memiliki ukuran dan kualitas partikel yang baik, kuat, padat, serta berbentuk bersudut. Selain itu, agregat juga perlu memiliki tekstur kasar, tingkat porositas rendah, dan permukaan yang bersih.

Berdasarkan persyaratan penggunaannya, agregat dapat dibedakan menjadi tiga jenis sebagai berikut.

1. Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan agregat dengan ukuran butiran yang tertahan pada saringan No. 8 (2,36 mm) sesuai dengan SNI 03-6819-2022. Adapun ketentuan atau persyaratan agregat kasar yang digunakan pada konstruksi perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Persyaratan Agregat Kasar

No	Nilai	Standar	Pengujian
1	Maks 12%	SNI 3407 : 2008	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium dan magnesium
2	>2,5	SNI 1969 : 2008	Berat Jenis
3	Maks 30%	SNI 2417 : 2008	Campuran AC bergradasi Kasar Abrasi dengan mesin *Los Angles*
4	Maks 40%		Semua jenis campuran aspal bergradasi lainnya.
5	< 95%	SNI-06-2439-1991	Kelekatan aspal pada agregat
6	95/90*	*DoT's Pennsylvania Test Method, PTM NO. 625*	Anugularitas (kedalaman dari permukaan < 10cm)
7	80/75*		Angularitas (Kedalaman dari permukaan ≥ 10cm)
8	Maks 10%	ASTMD 4791(1:5)	Partikel pipih dan lonjong
9	Maks 1%	SNI 03-4142-1996	Material lolos ayakan No. 200
10	< 3%	SNI 1969 : 2008	Penyerapan air oleh agregat

Catatan : (*) 95/90 menunjukkan bahwa agregat kasar mempunyai muka bidang pecah atau lebih dari 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

Sumber : Bina Marga (2018)

2. Agregat Halus

Agregat halus adalah material yang berasal dari pasir atau hasil ayakan pecahan batuan, dengan butiran yang lolos dari saringan No. 4 (4,75 mm) sesuai SNI 03-6819-2022. Ketentuan mengenai agregat halus yang digunakan pada perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Halus

No	Nilai	Standar	Pengujian
1	> 2,5	SNI 1970 : 2008	Berat Jenis
2	<3	SNI 1970 : 2008	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)
3	Min 60%	SNI 03-4428-1997	Nilai setara pasir
4	Maks 1%	SNI 3423 : 2008	Kadar Lempung
5	Min 45	SNI 03-6877-2002	Angularitas (kedalaman dari permukaan < 10cm)
6	Min 40	SNI 03-6877-2002	Angularitas (kedalaman dari permukaan ≥ 10cm)

Sumber : Bina Marga (2018)

3. Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi adalah agregat yang terbuat dari abu batu, abu batu kapur, semen (*Cement Portland*) atau bahan *non plastic* lainnya yang lolos saringan No. 200 (0,075mm). Fungsi *filler* adalah mengisi ruang antar partikel agregat besar dengan tujuan untuk mengurangi rongga, meningkatkan densitas, dan meningkatkan stabilitas.

3.1.1 Gradasi Agregat

Gradasi agregat merupakan susunan campuran agregat yang dinyatakan dalam persentase lolos dan persentase tertahan terhadap total berat. Gradasi ini diperoleh melalui uji analisis saringan menggunakan seperangkat saringan, yang dapat dilakukan baik dengan metode kering maupun basah.

Dalam metode Superpave, sebelumnya ada aturan zona larangan yang tidak boleh dilewati kurva gradasi agregat agar campuran tidak terlalu halus. Namun aturan ini kini tidak berlaku lagi, karena kinerja campuran lebih ditentukan oleh keseimbangan agregat kasar dan halus serta interlocking antar butir.

Gradasi atas adalah kurva yang mendekati batas atas envelope Superpave, artinya kandungan agregat halus lebih banyak. Campuran ini menghasilkan lapisan yang padat dan halus, tetapi kurang permeabel. Sedangkan Gradasi tengah berada di antara batas atas dan bawah, dengan proporsi agregat kasar dan halus yang seimbang. Campuran ini umumnya lebih stabil, fleksibel, dan mudah dikerjakan di lapangan. Dengan dihapuskannya zona larangan, baik gradasi atas maupun tengah tetap valid digunakan, disesuaikan dengan kondisi lalu lintas, iklim, dan tujuan desain.

3.2 *Superpave Asphalt*

Supepave adalah salah satu spesifikasi batu untuk gradasi campuran beton aspal yang dibuat oleh *Strategic Highway Research Program (SHRP). Superpave* menargetkan persyaratan spesifikasi gradasi berupa zona batasan berupa ukuran nominal minimum dan maksimum untuk setiap desain campuran aspal panas, dengan tujuan untuk mengurangi dampak keretakan baru dan deformasi plastis akibat pembebanan siklik kendaraan dan lalulintas. Campuran *Superpave* memberikan Solusi terhadap masalah beban dan perendaman yang dihadapi di lapangan. Hal ini disebabkan oleh kuatnya ikatan antar agregat pada campuran *Superpave*, sehingga perkerasan yang dihasilkan lebih tahan terhadap beban vertical dan masuknya air dalam jangka waktu tertentu. Berbagai jenis perkerasan digunakan sesuai dengan kondisi fisik dan geografis dari usulan konstruksi, pendanaan dan kecepatan konstruksi untuk menghindari pembangunan yang mengganggu lalu lintas. Jenis perkerasan jalan yang umum digunakan di Indonesia antara lain perkerasan lentur (*Flexible Pavement*) dan perkerasan kaku (*Rigid Pavement*).Perkerasan lentur terdiri dari batu pecah yang dicampur dengan bahan ikat bitumen atau aspal. Proses pencampuran ini dilakukan secara panas *(hot mix)* atau dingin (*cold mix*), dan kemudian dipadatkan dengan alat pemadat roda besi (*steel wheel*) atau pemadat roda karet *Pneumatic Tired Roller* (*PTR*).

Superpave adalah salah satu jenis gradasi yang bisa diadopsi di Indonesia. Penggunaan dan implementasi tipe gradasi ini telah mengalami perkembangan pesat di Amerika. Campuran *Superpave* merupakan gradasi campuran beton aspaI yang dikembangkan oleh *Strategic Highway Research Program (SHRP).*

Perkerasan jenis superpave sangat efektif bila digunakan di negara-negara dengan iklim ektrem, karena dapat mencegah penurunan kinerja akibat kondisi ekstrem (Zumwari 2019). Produk dari Program Penelitian Jalan Raya AS (SHRP), perkerasan aspal berkualitas tinggi (*Superpave*) dikembangkan antara tahun 1987 dan 1992 untuk mengatasi kerusakan jalan raya, retak Lelah dan retak termal. *Superpave* telah diadopsi oleh lapangan terbang karena keunggulan penghematan biaya dan kualitas yang baik. Sistem *Superpave* terdiri dari Evaluasi Pengikat Aspal, Desain Campuran Aspal, dan Evaluasi Kinerja Campuran Aspal (Tutu, dkk 2022). Campuran *Superpave* berfokus pada dua topik: deformasi plastis dan retak suhu rendah. Salah satu cara untuk meningkatkan ketahanan terhadap deformasi plastis adalah dengan mengidentifikasi agregat yang mampu menahan suhu tinggi dan gaya geser, yaitu agregat dalam bentuk grade curah (kubikal kadar), yaitu gradasi yang dapat menimbulkan daya retak antar partikel sehingga saling menghalangi dan mengunci.

Superpave menetapkan persyaratan spesifikasi ukuran butir target dalam hal ukuran nominal maksimum untuk setiap desain campuran panas dengan tujuan mengurangi efek deformasi plastis dan retak awal akibat pembebanan berulang kali dari kendaraan atau sarana pengangkut. Spesifikasi Gradasi Campuran *Superpave* dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Spesifikasi Gradasi Campuran *Superpave*

Standar Saringan (mm)	% Lolos pada Ukuran Nominal Maksimum				
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm
50					100
37,5				100	90-100
25			100	90-100	Maks.90
19		100	90-100	Maks.90	
12,5	100	90-100	Maks.90		
9,5	90-100	Maks. 90			
2,36	32-67	28-58	23-49	19-45	15-41
0,075	2-10,0	2-10,0	2,0-2,0	1,0-7,0	0,0-0,6

Lanjutan Tabel 3.4 Spesifikasi Gradasi Campuran *Superpave*

Recommended Restricted Zone					
4,75				39,5	34,7
2,36	47,2	39,1	34,6	26,8-30,8	23,3-27,3
1,18	31,6-37,6	25,6-31,6	22,3-28,3	18,1-24,1	15,5-21,5
0,6	23,5-27,5	19,1-23,1	16,7-20,7	13,6-17,6	11,7-15,7
0,3	18,7	15,5	13,7	11,4	10

AASHTO *Designation* : M 323-07. *Superpave Volumetric Mix Design* (2017).

Tabel 3.5 Spesifikasi Karakteristik Sifat Campuran pada Gradasi *Superpave*

No.	Sifat Campuran	Spesifikasi
1	% Rongga Terhadap Agregat	≥ 15

Lanjutan Tabel 3.5 Spesifikasi Karakteristik Sifat Campuran pada Gradasi *Superpave*

2	% Rongga Terisi Aspal	≥ 65
3	% Rongga Terhadap Campuran	3 - 5
4	Stabilitas	≥ 800
5	Kelelehan	2 - 4
6	*Marshall Quotient*	≥ 250

Sumber : Bina Marga (2018)

3.3 Campuran *Superpave*

SHRP telah membuat spesifikasi baru untuk gradasi campuran aspal yang disebut *Superpave*. *Superpave* menetapkan persyaratan untuk setiap spesifikasi gradasi dalam bentuk nominal maksimum pada setiap rancangan pembuatan campuran yang bertujuan agar diharapkan dapat mencegah kerusakan berupa retak awal dan deformasi permanen pada saat beban kendaraan melintas. Berikut ini spesifikasi sifat campuran yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut ini.

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: Bina Marga (2018)

3.4 Karakteristik *Marshall Standard*

Sifat uji *Marshall* pada saat pengujian campuran aspal dapat diukur dengan menggunakan parameter pengujian berikut.

3.4.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas merupakan kemampuan lapisan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen, seperti terbentuknya gelombang maupun alur (rutting). Besarnya nilai stabilitas dipengaruhi oleh kemampuan campuran dalam menciptakan gaya gesekan serta ikatan antarpartikel (interlocking). Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas antara lain ukuran butir, bentuk dan tekstur agregat, serta tingkat kepadatan campuran aspal yang ditentukan oleh kadar aspal, mutu agregat, dan distribusi ukuran partikel. Perhitungan nilai stabilitas dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.1 berikut..

$$Q = p \times q \tag{3.1}$$

dengan :

Q = Nilai Stabilitas

p = Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi proving ring, dan

q = Angka koreksi benda uji

3.4.2 Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan (*Flow*) adalah perubahan bentuk campuran aspal yang terjadi akibat pembebanan sampai pada titik runtuh yang dinyatakan dalam milimeter atau inci. Kelelehan menunjukkan besarnya deformasi vertikal yang terjadi pada kondisi

stabilitas maksimum akibat pembebanan. Nilai laju alir yang tinggi menyebabkan campuran mudah mengalami deformasi dan sebaliknya nilai laju alir yang rendah akan mudah rusak.

3.4.3 *Void in the Total Mix* (*VITM*)

VITM adalah persentase rongga udara dalam keseluruhan campuran aspal dan agregat. Parameter ini memiliki hubungan erat dengan sifat deformasi plastis campuran. Jika nilai VITM sesuai dengan standar, maka campuran aspal mampu menahan terjadinya deformasi plastis. Namun, apabila nilainya terlalu tinggi, campuran menjadi lebih berpori sehingga udara dan air mudah masuk, yang pada akhirnya mempercepat proses oksidasi dan memicu deformasi plastis. Sebaliknya, nilai VITM yang terlalu rendah dapat menimbulkan ketidakstabilan akibat aliran plastis. Nilai VITM dihitung menggunakan Persamaan 3.2 dan 3.3

$$n = 100 - (100 - \frac{g}{h}) \tag{3.2}$$

$$h = 100 - \left(\frac{100}{\frac{\%Agregat}{BJ\ Agregat} + \frac{\%Aspal}{BJ\ Aspal}} \right) \tag{3.3}$$

dengan :

n = nilai *VITM,*

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

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

3.4.4 *Marshall Quotient (MQ)*

Marshall Quotient (MQ) merupakan hasil pembagian antara nilai stabilitas dengan nilai flow. Besarnya MQ mencerminkan tingkat kelenturan campuran aspal–agregat, di mana nilai MQ yang tinggi menunjukkan campuran lebih kaku, sedangkan nilai MQ yang rendah menandakan campuran lebih lentur. Faktor-faktor yang memengaruhi nilai MQ sama dengan faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas dan flow, antara lain bentuk dan tekstur permukaan agregat, kualitas material, tingkat kohesi, serta viskositas aspal. Persamaan MQ dapat dilihat pada Persamaan 3.4.

$$MQ = \frac{q}{r} \tag{3.4}$$

dengan :

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

q = Nilai stabilitas (kg), dan

r = Nilai *flow* (mm)

3.4.5 Kepadatan (*Density*)

Nilai kepadatan merupakan nilai berat volume yang mewakili kepadatan campuran agregat aspal. Campuran dengan nilai kepadatan yang tinggi lebih mampu menahan beban, karena rongga dalam campuran menjadi lebih kecil dan partikel agregat akan mempunyai bidang kontak yang besar, sehingga gesekan antar partikel menjadi lebih besar dan menimbulkan impermeabilitas campuran terhadap udara dan air, sehingga akan sulit teroksidasi. Nilai *density* dapat diperoleh dari Persamaan 3.5 dan Persamaan 3.6 berikut ini.

$$g = \frac{e}{d-1} \tag{3.5}$$

$$f = d - e \tag{3.6}$$

dengan :

g = nilai *density* (gr/cc)

c = berat benda uji sebelum direndam (gr)

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

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

VFWA merupakan persentase rongga terisi aspal pada suatu campuran aspal setelah mengalami pemadatan. Faktor yang mempengaruhi adalah jumlah dan suhu pemadatan, distribusi ukuran partikel target dan penyerapan aspal mentah dan agregat. Nilai *VFWA* mempengaruhi ketahanan campuran terhadap udara dan air serta sifat elastis campuran, sehingga akan menentukan kestabilan, ketahanan, dan kelenturan campuran. Nilai *VFWA* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya bleeding dan jika terlalu rendah dapat menyebabkan campuran menjadi keropos (tidak kedap air dan udara) karena lapisan film aspal tipis sehingga rentan retak pada beban berat. Untuk mendapatkan rongga terisi aspal dapat diperoleh dari Persamaan 3.7 berikut ini.

$$VFWA = \frac{100\,(VMA - VITM)}{VMA} \tag{3.7}$$

dengan :

VFWA = Rongga terisi aspal, persen *VITM,*

VMA = Rongga diantara mineral agregat, persen volume bulk, dan

VITM = Volume pori dalam beton aspal padat.

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

VFWA merupakan persentase rongga terisi aspal pada suatu campuran aspal setelah mengalami pemadatan. Faktor yang mempengaruhi adalah jumlah dan suhu pemadatan, distribusi ukuran partikel target dan penyerapan aspal mentah dan agregat. Nilai *VFWA* mempengaruhi ketahanan campuran terhadap udara dan air serta sifat elastis campuran, sehingga akan menentukan kestabilan, ketahanan, dan kelenturan campuran. Nilai *VFWA* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya bleeding dan jika terlalu rendah dapat menyebabkan campuran menjadi keropos (tidak kedap air dan udara) karena lapisan film aspal tipis sehingga rentan retak pada beban berat. Untuk mendapatkan rongga terisi aspal dapat diperoleh dari Persamaan 3.7 berikut ini.

$$VFWA = \frac{100\,(VMA - VITM)}{VMA} \tag{3.7}$$

dengan :

VFWA = Rongga terisi aspal, persen *VITM,*

VMA = Rongga diantara mineral agregat, persen volume bulk, dan

VITM = Volume pori dalam beton aspal padat.

3.8.7 *Void in Mineral Agregate* (*VMA*)

VMA merupakan persentase volume rongga yang terbentuk di antara butiran agregat pada campuran aspal–agregat yang telah dipadatkan. VMA menggambarkan ruang yang tersedia untuk menampung aspal sekaligus rongga udara yang dibutuhkan dalam campuran. Besarnya nilai VMA dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ukuran partikel (terutama komposisi agregat dengan diameter terbesar), tekstur permukaan agregat, kadar aspal, serta kemampuan agregat menyerap air. Perhitungan nilai VMA dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.8 berikut.ini.

$$VMA = 100 - \frac{\text{Gmb x Ps}}{\text{Gsb}} \quad (3.8)$$

dengan :

VMA = Volume pori antara agregat didalam beton aspal, % dari volume bulk beton aspal padat,

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

P_s = Kadar agregat, % terhadap berat beton aspal padat, dan

G_{sb} = Berat jenis bulk dari agregat pembentuk beton aspal padat.

3.5 *Indirect Tensile Strength (ITS)*

ITS adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik pada campuran aspal. Dalam aplikasinya di lapangan, nilai ITS dimanfaatkan untuk memperkirakan potensi retak akibat kegagalan tarik, sehingga dapat membantu mengevaluasi kemungkinan terjadinya keretakan pada campuran. Prosedur pengujian dilakukan dengan memberikan beban pada sampel berbentuk silinder, di mana beban (dial) diletakkan sejajar dengan bidang vertikal sampel. Tekanan ini menghasilkan gaya tarik yang merata sepanjang diameter vertikal, sehingga silinder mengalami kerusakan berupa retakan pada diameter tersebut. Persamaan perhitungan ITS ditunjukkan pada Persamaan 3.9.

$$ITS = \frac{P}{h} \text{ x Ao} \quad (3.9)$$

dengan :

ITS = *Indirect Tensile Strength* (N/mm^2)

P_{runtuh} = beban puncak (kg)

h = tinggi sampel (cm)

Ao = konstanta

3.6 *Index of Retained Strength* (*IRS*)

IRS merupakan metode pengujian yang bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik campuran akibat pengaruh air, suhu, dan kondisi lingkungan. Dalam pengujian ini, benda uji direndam pada dua perlakuan berbeda, yaitu pada suhu 60°C selama 24 jam (untuk stabilitas rendam) dan pada suhu 60°C selama 30 menit (untuk stabilitas standar). Hasil dari pengujian ini menghasilkan

parameter yang dikenal sebagai Index of Retained Strength (IRS), yaitu persentase stabilitas Marshall yang tersisa dan digunakan sebagai indikator ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air. Perhitungan nilai IRS dilakukan dengan menggunakan persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan 3.10.

$$IRS = \frac{S2}{S1} \text{ X } 100\% \quad (3.10)$$

dengan :

S_1 = rata-rata nilai stabilitas *Marshall* setelah direndam selama 0,5 jam (kg), dan

S_2 = rata-rata nilai stabilitas *Marshall* setelah direndam selama 24 jam (kg)

3.7 *Cantabro Loss*

Cantabro Loss merupakan metode pengujian yang digunakan untuk menilai tingkat ketahanan benda uji terhadap keausan. Proses pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin Los Angeles, di mana benda uji terlebih dahulu dipadatkan pada kedua sisinya sebanyak 2 × 75 tumbukan. Setelah itu, benda uji dimasukkan ke dalam drum Los Angeles tanpa bola baja dan diputar sebanyak 300 kali putaran. Nilai Cantabro Loss (CL) kemudian dihitung menggunakan persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan 3.11.

$$CL = \frac{Mo-Mi}{Mo} \text{ x } 100\% \quad (3.11)$$

Dengan :

Mo = Berat sebelum diabrasi (gr),

Mi = Berat setelah diabrasi (kg), dan

CL = Persentase kehilangan berat (%).

3.8 Pengaruh Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Perkerasan

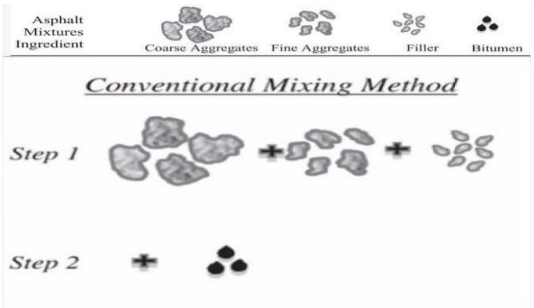
Metode pencampuran beton aspal saat ini tidak hanya terbatas pada cara konvensional, tetapi juga telah dikembangkan metode baru yaitu pencampuran bertahap. Metode ini dirancang untuk meningkatkan kinerja campuran beton aspal dengan melakukan modifikasi pada tahapan pencampuran agregat dan aspal. Hasil penerapan metode pencampuran bertahap menunjukkan nilai CL yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Nilai CL yang rendah ini mengindikasikan bahwa ikatan antara agregat dan aspal terbentuk dengan baik,

sehingga campuran mampu mempertahankan kondisinya sebelum terjadi benturan.

3.8.1 Metode Pencampuran Konvensional

Metode pencampuran konvensional yaitu metode pencampuran dengan memanaskan seluruh agregat bersamaan hingga suhu tertentu, dilanjutkan dengan mencampurkan aspal yang telah dipanaskan kemudian diaduk hingga homogen (Brown, dkk. 2009).

Gambar Skema Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Konvensional dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.

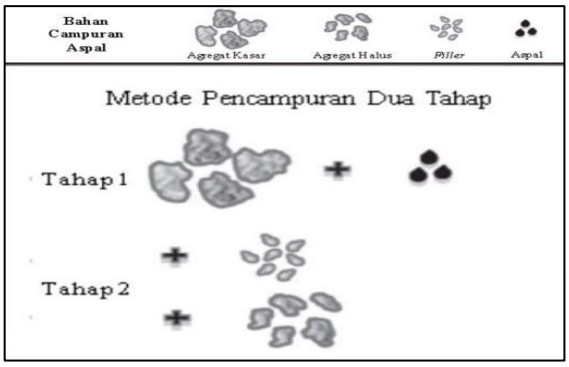


Gambar 3.1 Skema Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Konvensional
(Sumber: Hesami, dkk, 2015)

3.8.2 Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode pencampuran dua tahap merupakan strategi dalam meningkatkan kinerja sifat campuran pada aspal dengan cara memodifikasi tahapan-tahapan proses pencampuran aspal dan agregat. Metode ini diawali dengan melakukan pencampuran pada agregat kasar dengan kadar aspal yang tepat yang kemudian mencampurkannya dengan agregat halus dan bahan pengisi (*filler*) yang telah ditentukan, dengan tujuan diharapkan dapat memperkuat daya ikat antara aspal dengan agregat sehingga dapat mengurangi resiko terkelupasnya agregat apabila terkena kelembaban, dan mengurangi resiko terbentuknya debu atau kontaminan yang dapat mempengaruhi kualitas campuran aspal (Kok dan Kuloglu, 2011).

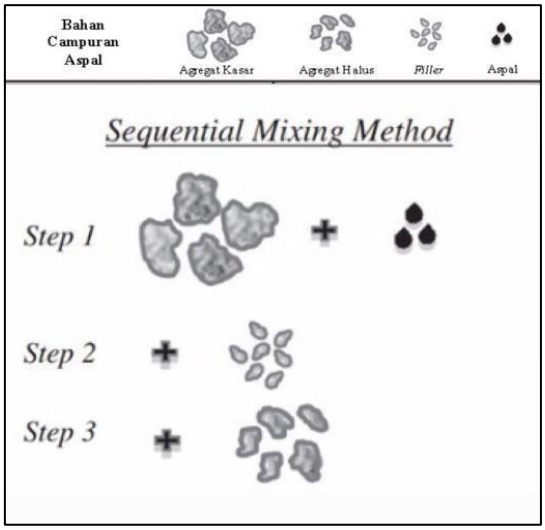
Menurut penelitian Hidayat (2021) mengenai pengaruh metode pencampuran dua tahap pada karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan bahan pengikat aspal Pen 60/70 dan *Crumb Rubber*, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan metode pencampuran konvensional dengan metode dua tahap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pencampuran dua tahap memberikan kinerja perkerasan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional pada kedua jenis bahan pengikat tersebut. Pada pengujian *Marshall Standard, Immersion Test, Indirect Tensile Strength*, serta *Cantabro Loss*, metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Skema tahapan proses pencampuran dengan metode dua tahap ditampilkan pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Dua Tahap
Sumber: Hesami dkk (2015)

3.8.2 Metode Pencampuran Tiga Tahap

Metode pencampuran tiga tahap adalah metode pencampuran dengan kondisi awal agregat kasar dan aspal dipanaskan dan dicampur secara bersamaan, kemudian baru disusul dengan penambahan *filler* lalu dicampur sampai homogen dan terakhir ditambah dengan agregat halus (Metode Bertahap 3). Berikut ini merupakan skema diagram tahapan proses proses pencampuran metode pencampuran dua tahap dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Diagram Tahapan Proses Pencampuran Metode Tiga Tahap
Sumber: Hesami dkk (2015)

Pada penelitian Wahyudi (2020), menunjukkan bahwa metode 3 disarankan untuk digunakan pada campuran *Superpave* karena menghasilkan nilai stabilitas, *IRS*, dan *Cantabro Loss* yang terbaik.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis serta membandingkan dua tipe campuran perkerasan Superpave, yaitu gradasi atas dan gradasi tengah, dengan menerapkan dua metode pencampuran, yakni metode konvensional dan metode tiga tahap.

Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental, yaitu dengan membuat sampel benda uji sesuai jumlah yang direncanakan serta variabel tertentu, kemudian dilakukan pengujian untuk memperoleh data. Data hasil uji selanjutnya diolah guna mendapatkan perbandingan yang sesuai dengan standar dan ketentuan Bina Marga 2018. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diketahui pengaruh metode pencampuran terhadap kinerja campuran aspal beton Superpave gradasi atas dan tengah berdasarkan parameter nilai MS, IRS, ITS, serta *CL*.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Penelitian ini menggunakan tiga metode pencampuran, yaitu metode pencampuran konvensional, metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran tiga tahap. Aspal yang digunakan adalah aspal pen 60/70. Pada tahap pertama dilakukan pengujian *Marshall* untuk mencari nilai KAO dengan metode konvensional sebanyak 30 sampel. Selanjutnya setelah didapatkan nilai KAO dilakukan pengujian *Marshall*, *ITS*, *IRS* dan *CL* dengan metode konvensional sebanyak 18 sampel, lalu dilanjutkan dengan metode pencampuran dua tahap 18 sampel, dan terakhir dilanjutkan dengan metode pencampuran tiga tahap 18 sampel.

4.3 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan selama pengujian agar mempermudah pengambilan data, maka dilakukan pengelompokan benda uji sehingga didapatkan data berupa nilai stabilitas, *flow,*

MQ, VITM, VMA, VFWA, nilai *IRS,* nilai *ITS,* dan nilai *CL.*

4.4 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Adapun tahapan pelaksanaan penelitian ini meliputi:

1. Tahap Persiapan

   Tahap ini merupakan proses menyiapkan serta mengumpulkan bahan dan peralatan yang diperlukan untuk pembuatan sampel.

2. Perancangan Gradasi dan Berat Agregat

   Tahapan pengujian menggunakan teknik *Job Mix Formula* (JMF) atau *trial and eror* untuk merencanakan gradasi dan kebutuhan material yang akan digunakan serta memperoleh hasil gradasi rencana dan berat sampel untuk setiap kadar aspal.

3. Tahap Pembuatan Sampel.

   Pada tahap ini diambil sampel berbahan agregat kasar,agregat halus, dan *filler* berdasarkan hasil *JMF.* Campur dan masak dan tambahkan aspal yang direncanakan, selanjutnya lakukan penumbukkan dari setiap sampel yang sudah dimasak.

4. Tahap Pengujian Sampel

   Tahap pengujian sampel merupakan rangkaian uji yang telah ditetapkan sejak tahap perencanaan, mencakup pengujian terhadap agregat, aspal, serta seluruh campuran yang digunakan. Pengujian dilakukan dengan parameter MS, ITS, TSR, IRS, dan CL.

5. Tahap Analisis Data

   Analisis data merupakan rangkaian kegiatan untuk mengolah serta menelaah data yang diperoleh dari hasil pengujian. Data yang telah dianalisis kemudian dibandingkan dengan ketentuan standar yang berlaku, yaitu SNI dan Bina Marga.

6. Tahap Kesimpulan

   Fase atau tahapan ini merupakan fase akhir penelitian, dimana konten diselesaikan dan hasil analisis data dibandingkan dengan standar yang ada.

4.5 Langkah-Langkah Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini mencakup beberapa tahapan pengujian serta penentuan kadar aspal optimum (KAO) yang bertujuan untuk menetapkan dan menyesuaikan hasil dengan standar yang berlaku.

1. Pengujian Agregat

   Pengujian agregat meliputi beberapa jenis pengujian, antara lain uji penyerapan air, uji berat jenis, uji kelekatan aspal terhadap agregat, serta uji abrasi, dan Pengujian *Sand Equivalent.*

2. Pengujian Aspal

   Pengujian aspal ini terdiri dari beberapa pengujian yaitu diantaranya adalah Pengujian Titik Lembek, Pengujian Penetrasi Aspal, Pengujian Titik Nyala dan Bakar, Pengujian Berat Jenis Aspal, Pengujian Kelarutan Dalam *CCL4, Dan* Pengujian Daktilitas.

3. Penentuan Nilai Kadar Aspal Optimum

   Pada penentuan KAO ini digunakan percobaan gradasi tengah dengan kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% dan gradasi atas dengan KAO 5%, 5,5%, 6%,6,5%, 7%.

4. Pembuatan Sampel Berdasarkan Nilai KAO

5. Pengujian *MS, IRS, ITS, TSR, CL* pada sampel yang sudah dibuat.

4.6 Peralatan Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan peralatan yang tersedia di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, meliputi alat uji *MS, IRS, ITS, serta CL.*

Bahan campuran yang digunakan terdiri dari agregat kasar, agregat halus, dan aspal, dengan pemilihan serta perencanaan yang didasarkan pada spesifikasi aspal *Superpave SHRP A-407 (1994).*

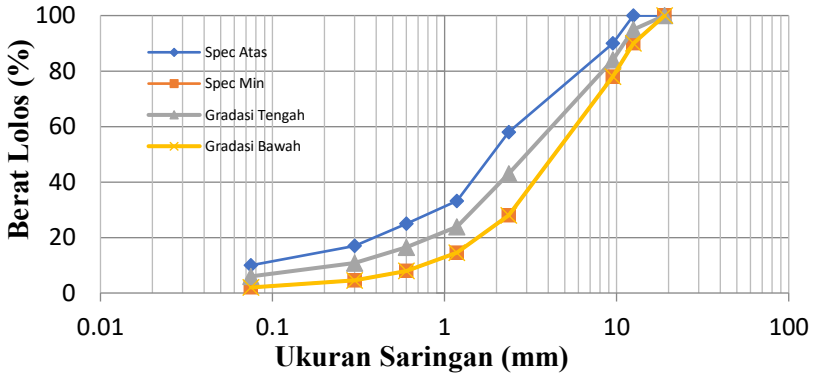
Rancangan gradasi agregat untuk campuran *Superpave* yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Gradasi Agregat Campuran *Superpave*

Ukuran Saringan			Spesifikasi		Jumlah Persen %			
					Gradasi Rencana Atas		Gradasi Rencana Tengah	
			Min	Max	Lolos	Tertahan	Lolos	Tertahan
3/4 "	19	mm	100	100	100	0	100	0
1/2 "	12,5	mm	90	100	100	0	95	5
3/8 "	9,5	mm	78	90	90	10	84	16
No. 8	2,36	mm	28	58	58	42	43	57
No. 16	1,18	mm	14,57	33,21	33,21	66,79	23,89	76,11
No. 30	0,6	mm	7,97	25	25	75	16,485	83,515
No. 50	0,3	mm	4,56	17	17	83	10,78	89,22
No. 200	0,075	mm	2	10	10	90	6	94
Pen			0	0	0	100	0	100

Sumber : *Strategic Highway Research Program (SHRP)*

Gradasi rencana yang digunakan dalam campuran aspal *Superpave* dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 4.1 Rencana Gradasi Agregat Campuran *Superpave*

Untuk detail perhitungan kadar aspal perkiraan (Pb) didapatkan dari persamaan 3.12.

$$Pb = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045\ (\%FA) + 0{,}18(\%Filler) + C \qquad (3.12)$$

dengan :

Pb = Kadar Aspal Perkiraan

CA = Agregat kasar tertahan saringan no.8

FA = Agregat halus lolos saringan no.8 dan tertahan no.200

Filler = Agregat halus lolos saringan no.200

Konstanta (C) = Konstanta 0.5 – 1 untuk Lapisan Aspal Beton (Laston)

Dari hasil persamaan 3.1 diatas maka dapat dihitung perkiraan nilai kadar aspal untuk gradasi tengah sebagai berikut :

Pb = 0,035 (%CA) + 0,045 (%FA) + 0,18(%*Filler*) + C

= 0,035 (57%) + 0,045 (37) +0,18(6) + 0,5

= 5,24 %

Berdasarkan dari perhitungan perkiraan kadar aspal untuk gradasi atas kisaran 5,93%. Sehingga kadar aspal yang akan digunakan untuk pengujian ini adalah 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%, 7% terhadap berat total campuran sebesar 1200 gram. Untuk kadar aspal perkiraan untuk gradasi tengah kisaran 5.24%, sehingga kadar aspal yang akan digunakan untuk pengujian gradasi tengah ini adalah 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5% terhadap berat total campuran sebesar 1200 gram.

Kebutuhan agregat pada tiap-tiap kadar aspal gradasi tengah dapat dilihat pada Tabel 4.2 sampai Tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 4,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0
1/2 "	12,5	90	100	95	5	5	57,30
3/8 "	9,5	78	90	84	16	11	126,06
No. 8	2,36	28	58	43	57	41	469,86
No. 16	1,18	14,57	33,21	23,89	76,11	19,11	219,00
No. 30	0,600	7,97	25	16,49	83,52	7,41	84,86
No. 50	0,300	4,56	17	10,78	89,22	5,71	65,38
No. 200	0,075	2	10	6	94	4,78	54,78
Pan		0	0	0	100	6,00	68,76
Total							1146

Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0
1/2 "	12,5	90	100	95	5	5	57
3/8 "	9,5	78	90	84	16	11	125,40
No. 8	2,36	28	58	43	57	41	467,40
No. 16	1,18	14,57	33,21	23,89	76,11	19,11	217,85
No. 30	0,600	7,97	25	16,49	83,52	7,41	84,42
No. 50	0,300	4,56	17	10,78	89,22	5,71	65,04
No. 200	0,075	2	10	6	94	4,78	54,49
Pan		0	0	0	100	6,00	68,40
Total							1140

Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 5,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0,00
1/2 "	12,5	90	100	95	5	5	56,70
3/8 "	9,5	78	90	84	16	11	124,74
No. 8	2,36	28	58	43	57	41	464,94
No. 16	1,18	14,57	33,21	23,89	76,11	19,11	216,71
No. 30	0,600	7,97	25	16,49	83,52	7,41	83,97
No. 50	0,300	4,56	17	10,78	89,22	5,71	64,69
No. 200	0,075	2	10	6	94	4,78	54,21
Pan		0	0	0	100	6,00	68,04
Total							1134

Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0,00
1/2 "	12,5	90	100	95	5	5	56,40
3/8 "	9,5	78	90	84	16	11	124,08
No. 8	2,36	28	58	43	57	41	462,48
No. 16	1,18	14,57	33,21	23,89	76,11	19,11	215,56
No. 30	0,600	7,97	25	16,49	83,52	7,41	83,53
No. 50	0,300	4,56	17	10,78	89,22	5,71	64,35
No. 200	0,075	2	10	6	94	4,78	53,92
Pan		0	0	0	100	6,00	67,68
Total							1128

Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat Gradasi Tengah pada Kadar Aspal 6,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0,00
1/2 "	12,5	90	100	95	5	5	56,10
3/8 "	9,5	78	90	84	16	11	123,42
No. 8	2,36	28	58	43	57	41	460,02
No. 16	1,18	14,57	33,21	23,89	76,11	19,11	214,41
No. 30	0,600	7,97	25	16,49	83,52	7,41	83,08
No. 50	0,300	4,56	17	10,78	89,22	5,71	64,01
No. 200	0,075	2	10	6	94	4,78	53,63
Pan		0	0	0	100	6,00	67,32
Total							1122

Kebutuhan agregat pada tiap-tiap kadar aspal untuk gradasi atas dapat dilihat pada Tabel 4.7 sampai Tabel 4.11 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0
1/2 "	12,5	90	100	100	0	0	0.00
3/8 "	9,5	78	90	90	10	10	114
No. 8	2,36	28	58	58	42	32	364,80
No. 16	1,18	14,57	33,21	33,21	66,79	24,79	282,606
No. 30	0,600	7,97	25	25,00	75,00	8,21	93,594
No. 50	0,300	4,56	17	17,00	83,00	8,00	91,200
No. 200	0,075	2	10	10	90	7,00	79,800
Pan		0	0	0	0	10,00	114,00
Total							1140

Tabel 4.8 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 5,5 %

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0
1/2 "	12,5	90	100	100	0	0	0.00
3/8 "	9,5	78	90	90	10	10	113,40
No. 8	2,36	28	58	58	42	32	362,88
No. 16	1,18	14,57	33,21	33,21	66,79	24,79	281,119
No. 30	0,600	7,97	25	25,00	75,00	8,21	93,101
No. 50	0,300	4,56	17	17,00	83,00	8	90,720
No. 200	0,075	2	10	10	90	7	79,380
Pan		0	0	0	0	10.00	113,400
Total							1134

Tabel 4.9 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0
1/2 "	12,5	90	100	100	0	0	0.00
3/8 "	9,5	78	90	90	10	10	112.800
No. 8	2,36	28	58	58	42	32	360.96
No. 16	1,18	14,57	33,21	33,21	66,79	24,79	279.631
No. 30	0,600	7,97	25	25,00	75,00	8,21	92.609
No. 50	0,300	4,56	17	17.00	83,00	8	90.240
No. 200	0,075	2	10	10	90	7	78.960
Pan		0	0	0	0	10.00	112.800
Total							1128

Tabel 4.10 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 6,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0
1/2 "	12,5	90	100	100	0	0	0
3/8 "	9,5	78	90	90	10	10	112,2
No. 8	2,36	28	58	58	42	32	359
No. 16	1,18	1,.57	33,21	33,21	66,79	24,79	278,144
No. 30	0,600	7,97	25	25,00	75,00	8,21	92,116
No. 50	0,300	4,56	17	17,00	83,00	8	89,760
No. 200	0,075	2	10	10	90	7	78,540
Pan		0	0	0	0	10.00	112,200
Total							1122

Tabel 4.11 Kebutuhan Agregat Gradasi Atas pada Kadar Aspal 7%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Jumlah Persen %		Total Campuran	Berat (gr)
inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan		
3/4 "	19	100	100	100	0	0	0,000
1/2 "	12,5	90	100	100	0	0	0,000
3/8 "	9,5	78	90	90	10	10	111,600
No. 8	2,36	28	58	58	42	32	357,120
No. 16	1,18	14,57	33,21	33,21	66,79	24,79	276,656
No. 30	0,600	7,97	25	25,00	75,00	8,21	91,624
No. 50	0,300	4,56	17	17,00	83,00	8	89,280
No. 200	0,075	2	10	10	90	7	78,120
Pan		0	0	0	0	10.00	10,600
Total							1116

4.7 Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Perkerasan

Metode pencampuran beton aspal saat ini tidak terbatas pada cara konvensional saja, melainkan telah dikembangkan metode baru yaitu pencampuran bertahap. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan performa campuran beton aspal melalui modifikasi tahapan pencampuran antara aspal dan agregat.

4.7.1 Metode Pencampuran Konvensional

Metode pencampuran konvensional dilakukan dengan cara memanaskan seluruh agregat secara bersamaan hingga mencapai suhu tertentu, kemudian dicampurkan dengan aspal yang juga telah dipanaskan, lalu diaduk hingga tercampur merata (Brown, dkk 2009).

4.7.2 Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode pencampuran bertahap pada perkerasan ada beberapa metode diantaranya adalah metode pencampuran dengan kondisi awal agregat kasar dan aspal dipanaskan dan dicampur secara bersamaan, kemudian baru disusul dengan penambahan *filler* dan agregat halus (Metode Bertahap 2).

Campuran aspal yang dihasilkan dengan metode pencampuran dua tahap memperlihatkan distribusi rongga yang lebih merata. Kondisi ini menunjukkan

bahwa metode tersebut mampu menghasilkan proses pemadatan yang lebih optimal. Selain itu, campuran aspal dari metode ini juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen serta menunjukkan nilai kekuatan tarik tidak langsung yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran yang dibuat menggunakan metode konvensional.

Penelitian yang dilakukan Hidayat (2021) tentang pengaruh pencampuran dua tahap terhadap kinerja campuran Stone Matrix Asphalt dengan bahan ikat aspal pen 60/70 dan aspal crumb rubber menjadi fokus dalam penelitian ini. Tujuan penelitian adalah membandingkan kinerja metode pencampuran dua tahap dengan metode konvensional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode pencampuran dua tahap memberikan performa lebih baik. Pada uji *Marshall Standard, Immersion Test, Indirect Tensile Strength,* dan *Cantabro Loss*, metode ini menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional..

4.7.3 Metode Pencampuran Tiga Tahap

Metode pencampuran tiga tahap adalah metode pencampuran dengan kondisi awal agregat kasar dan aspal dipanaskan dan dicampur secara bersamaan, kemudian baru disusul dengan penambahan *filler* lalu dicampur sampai homogen dan terakhir ditambah dengan agregat halus (Metode Bertahap 3).

Pada penelitian Wahyudi (2020), menunjukkan bahwa metode 3 disarankan untuk digunakan pada campuran *Superpave* karena menghasilkan nilai stabilitas, *IRS*, dan *Cantabro Loss* yang terbaik.

4.8 Variasi dan Jumlah Sampel Penelitian

Pada penelitian ini terlebih dahulu diuji agregat dan aspal sebelum digunakan sebagai campuran perkerasan *Superpave.* Pengujian menggunakan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran agregat kasar, agregat medium, dan aspal di *mix* kemudian disusul agregat halus (metode 3).

Dalam campuran beraspal, gradasi atas dan gradasi tengah menunjukkan perbedaan tingkat kehalusan agregat. Gradasi atas berada pada batas maksimum spesifikasi, sehingga campuran cenderung lebih halus karena jumlah agregat halus yang lolos saringan lebih banyak. Sementara itu, gradasi tengah berada di posisi

rata-rata antara batas atas dan bawah, sehingga menghasilkan campuran yang lebih seimbang, tidak terlalu halus maupun terlalu kasar, dan sering dijadikan acuan dalam perencanaan awal campuran.

Total sampel yang direncanakan dalam penelitian ini berjumlah 84 buah, dengan rincian 30 sampel digunakan untuk menentukan KAO, sedangkan 54 sampel sisanya dipakai untuk setiap pengujian pada nilai KAO. Rincian jumlah masing-masing sampel penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.12 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO

Jenis Spec gradasi	***Superpave***				
	Kadar Aspal				
	5%	**5,5%**	**6%**	**6,5%**	**7%**
Gradasi Atas	3	3	3	3	3
	4,5%	**5%**	**5,5%**	**6%**	**6,5%**
Gradasi Tengah	3	3	3	3	3
Total	30				

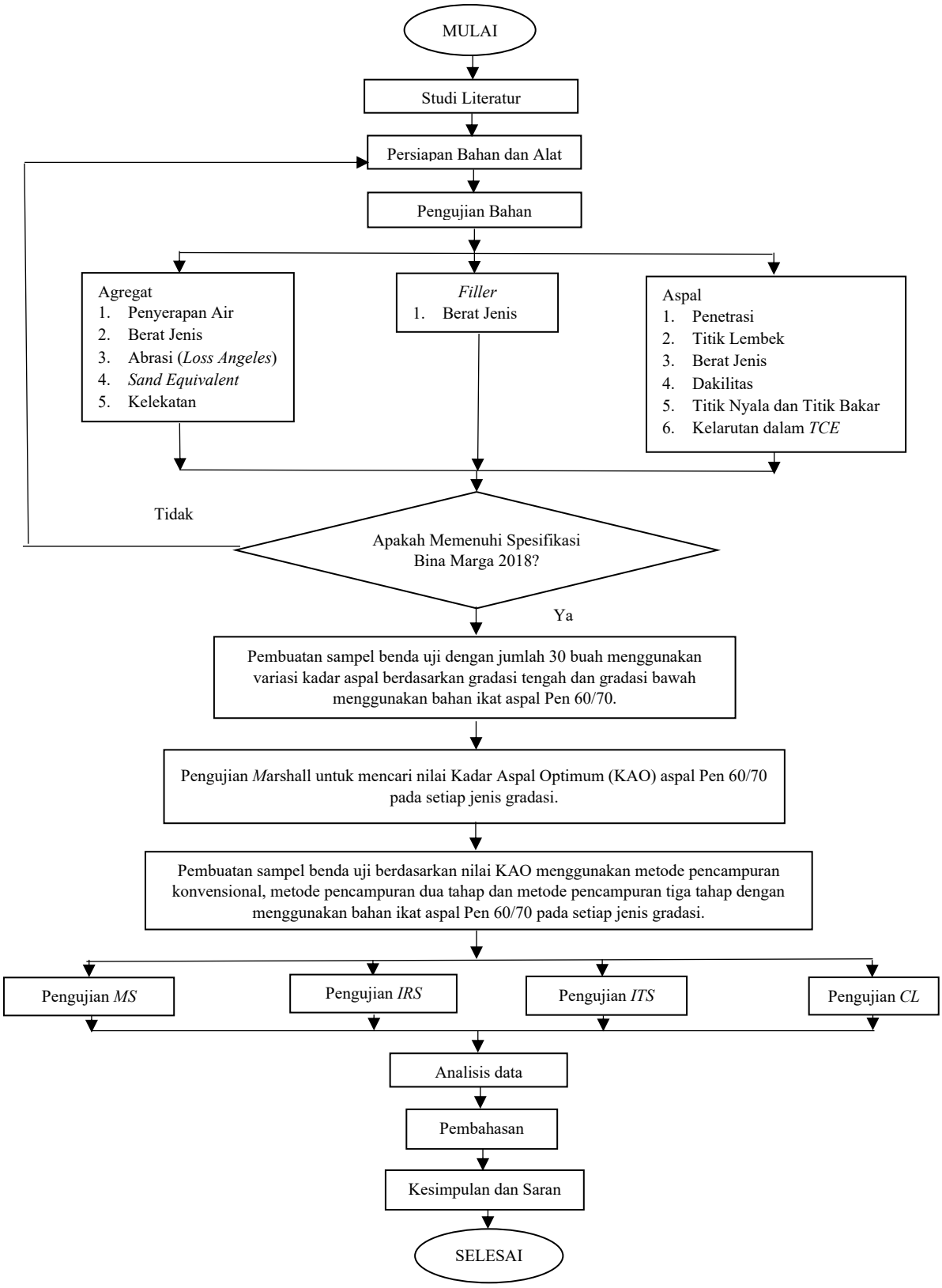
Tabel 4.13 Jumlah Benda Uji Pada Kondisi KAO

Pengujian	Variasi Pencampuran *Superpave*					
	Metode 1		Metode 2		Metode 3	
	Gradasi atas	Gradasi tengah	Gradasi atas	Gradasi Tengah	Gradasi atas	Gradasi Tengah
Marshall	3	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3	3	3
Cantabro Loss	3*	3*	3*	3*	3*	3*
Total	54					

Catatan *: Menunjukkan benda uji yang dipakai pada pengujian *cantabro loss* adalah benda uji yang dari *ITS.*

4.9 Bagan Alir Penelitian

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



Gambar 4.2 *Flowchart* Penelitian

BAB V
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, diperoleh hasil dari setiap pengujian sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Agregat yang digunakan pada penelitian ini merupakan agregat yang telah tersedia di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil pengujian masing-masing parameter dapat dilihat pada Tabel 5.1 hingga Tabel 5.3.

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat Jenis	≥ 2,5	2,701
2	Penyerapan Air pada Agregat	≤ 3	0,926
3	Keausan dengan Mesin *LA* (%)	≤ 40	19,4

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat Jenis	≥ 2,5	2,769
2	Penyerapan Air pada Agregat	≤ 3	2,077
3	*Sand Equivalent* (%)	≥ 50	93,35

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Filler

No	*Filler*	Hasil
1	Berat Jenis Debu Batu	2,733

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Uji karakteristik aspal Pen 60/70 dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Data Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat Jenis	≥ 1,0	1,034
2	Penetrasi (0,1mm)	60-70	63,2
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	165
4	Titik Nyala (˚C)	≥ 232	320
5	Titik Bakar (˚C)	≥ 232	330
6	Titik Lembek (˚C)	≥ 48	48
7	Kelarutan *TCE* (%)	≥ 99	99,524

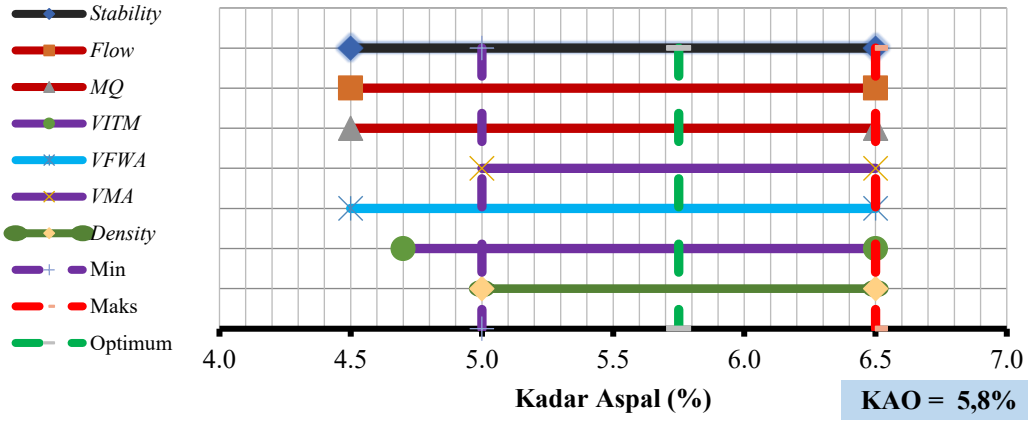
5.1.3 Hasil Pengujian Menentukan Kadar Aspal Optimum Campuran *Superpave*

Hasil yang diperoleh dalam menentukan kadar aspal optimum adalah nilai *stability*, *flow*, *MQ*, *VITM*, *VFWA*, *VMA*, dan *density.* Hasil dari pengujian untuk menentukan KAO pada setiap gradasi dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Menentukan KAO Campuran *Superpave* Gradasi Tengah

Kadar Aspal (%)	*Stability* (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*VMA* (%)	*Density* (gr/cc)
4,5	1090,95	2,39	456,47	5,15	67,14	14,25	2,42
5	1184	2,60	455,38	4,74	71,09	14,98	2,41
5,5	1427,62	3,00	475,87	4,01	76,17	15,43	2,41
6	1249,71	3,02	413,81	3,89	78,13	16,40	2,40
6,5	1141	3,10	374,87	3,53	80,65	17,16	2,39
Spesifikasi	>800	2-4	>250	3-5	>65	>15	

Berdasarkan Tabel 5.5, hasil pengujian penentuan KAO Campuran *Superpave* Gradasi Tengah menunjukkan bahwa nilai KAO untuk gradasi tengah adalah sebesar 5,8, seperti ditampilkan pada Gambar 5.1.

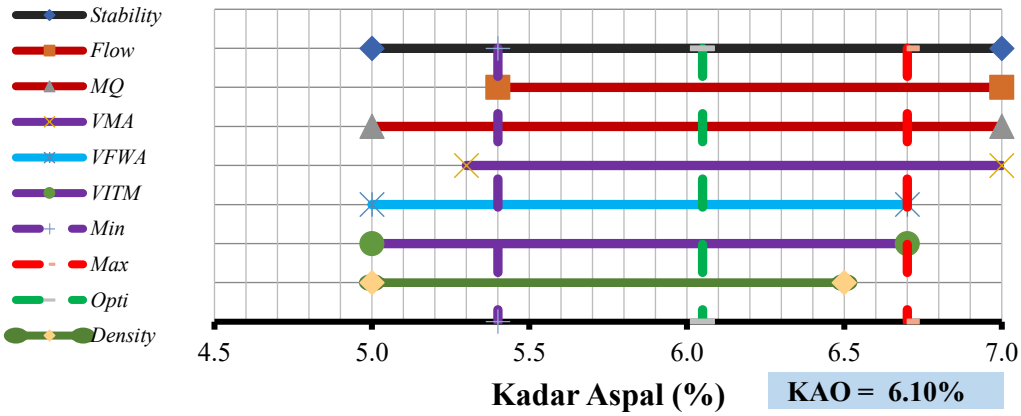


Gambar 5.1 Penentuan Kadar Aspal Optimum Campuran *Superpave* Gradasi Tengah

Tabel 5.6 Hasil Pengujian Penentuan KAO Campuran *Superpave* Gradasi Atas

Kadar Aspal (%)	*Stability* (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*VMA* (%)	*Density* (gr/cc)
5,0	1233	1,70	725,29	4,57	71,940	14,75	2,423
5,5	1470	2,10	700,00	3,80	77,237	15,16	2,424
6,0	1594	2,20	724,55	3,67	79,205	16,13	2,409
6,5	1248	2,50	499,20	3,43	81,458	16,99	2,397
7,0	1139	2,80	406,79	2,14	88,409	16,95	2,411
Spesifikasi	>800	2-4	>250	3-5	>65	>15	

Berdasarkan Tabel 5.6, hasil pengujian penentuan KAO Campuran *Superpave* Gradasi Atas menunjukkan bahwa nilai KAO untuk gradasi atas adalah sebesar 5,8, seperti ditampilkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Penentuan Kadar Aspal Optimum Campuran *Superpave* Gradasi Atas

5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Superpave* Berdasarkan Jenis Gradasi dengan Bahan Ikat Pen 60/70 pada KAO

Pengujian campuran *Superpave* dalam penelitian ini mencakup *Marshall Standard, IRS, ITS,* dan *CL*, yang dilakukan menggunakan tiga metode, yaitu metode 1 (konvensional), metode 2 (dua tahap), dan metode 3 (tiga tahap). Rekapitulasi data hasil setiap pengujian disajikan pada Tabel 5.7 hingga Tabel 5.11.

Tabel 5.7 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Standard pada Campuran *Superpave* Gradasi Tengah

Metode	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VMA* (%)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*Density* (gr/cc)
1	1445,56	3,37	428,05	15,92	3,83	77,88	2,403
2	1463,00	3,33	439,34	15,76	3,65	78,75	2,408
3	1487,00	3,20	464,69	15,71	3,59	79,01	2,409
Spesifikasi	>800	>2-4	>250	>15	3-5	>65	

Tabel 5.8 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall Standard* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas

Metode	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VMA* (%)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*Density* (gr/cc)
1	1488,50	3,30	451,06	15,90	3,16	81,94	2,418
2	1508,35	3,24	465,54	15,75	3,09	82,26	2,422
3	1520,05	3,17	479,51	15,69	3,01	82,61	2,425
Spesifikasi	>800	>2-4	>250	>15	3-5	>65	

Tabel 5.9 Rekapitulasi Hasil Pengujian *IRS* pada Setiap Jenis Gradasi

Metode	*IRS* (%)	
	Gradasi Atas	Gradasi Tengah
1	91,42	90,28
2	93,92	92,19
3	94,52	93,94

Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Pengujian *ITS* pada Setiap Jenis Gradasi

Metode	*ITS* (kg/cm)	
	Gradasi Atas	Gradasi Tengah
1	19,36	18,00
2	20,46	19,96
3	22,03	21,49

Tabel 5.11 Rekapitulasi Hasil Pengujian *CL* pada Setiap jenis Gradasi

Metode	*CL* (%)	
	Gradasi Atas	Gradasi Tengah
1	4,50	4,92
2	3,56	3,90
3	2,68	2,82

5.2 Pembahasan

5.2.1 Karakteristik Agregat Kasar

Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, karakteristik agregat kasar diperoleh dengan hasil sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat

Pengujian berat jenis agregat pada penelitian ini dilakukan dengan mengukur berat benda uji pada kondisi jenuh permukaan kering (BJ), berat kering udara (BA), serta berat kering oven (BK). Dari hasil pengujian diperoleh nilai berat jenis agregat kasar sebesar 2,701, yang telah sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu minimal 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat

Penyerapan air oleh agregat merupakan kemampuan material dalam menyerap air ke dalam rongga atau pori-porinya. Berdasarkan hasil pengujian, nilai penyerapan air agregat kasar adalah 0,926%, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu < 3%.

3. Kehausan oleh Mesin LA

Pengujian keausan agregat bertujuan untuk mengetahui ketahanan agregat terhadap abrasi menggunakan mesin Los Angeles (LA). Hasil penelitian menunjukkan nilai keausan sebesar 19,4%, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu ≤ 40%.

5.2.2 Karakteristik Agregat Halus

Berdasarkan hasil serangkaian pengujian yang dilakukan, karakteristik agregat halus diperoleh sebagai berikut:

1. Berat Jenis Agregat

Pengujian berat jenis agregat halus dalam penelitian ini meliputi pengukuran berat benda uji pada kondisi jenuh permukaan kering (BJ), berat dalam air (BA), dan berat setelah dikeringkan di oven (BK). Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis agregat halus adalah 2,769, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, yakni ≥ 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat

Penyerapan air pada agregat menggambarkan kemampuan material untuk menyerap air ke dalam pori-porinya. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai penyerapan air agregat halus sebesar 2,077%, yang memenuhi ketentuan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu kurang dari 3%.

3. *Sand Equivalent*

Nilai *Sand Equivalent* menggambarkan persentase kandungan debu dan lumpur pada agregat halus. Dari hasil penelitian diperoleh nilai sebesar 93,3%, yang telah sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu sekurang-kurangnya 50.

4. *Filler*

Filler berasal dari agregat halus yang lolos saringan No. 200. Pada penelitian ini, nilai *filler* yang diperoleh sebesar 2,733%.

5.2.3 Karakteristik Aspal

Berdasarkan serangkaian pengujian yang dilakukan, karakteristik aspal Pen 60/70 diperoleh sebagai berikut:

1. Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal berfungsi penting dalam perencanaan serta perancangan perkerasan jalan. Nilai ini didapat dari perbandingan antara massa aspal dengan volumenya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis aspal pada penelitian ini sebesar 1,034, yang telah sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu ≥ 1.

2. Penetrasi Aspal

Uji penetrasi aspal bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal. Hasil pengujian menunjukkan nilai penetrasi sebesar 63,2 mm, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 untuk Pen 60–70.

3. Daktilitas Aspal

Duktilitas aspal menunjukkan tingkat kelenturan material tersebut. Pada penelitian ini, hasil pengujian duktilitas aspal menunjukkan nilai sebesar 164 cm tanpa putus, sehingga memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 untuk aspal Pen 60/70, yaitu minimal 100 cm.

4. Titik Nyala Aspal

Titik nyala adalah suhu saat aspal mulai menghasilkan percikan api sesaat. Hasil pengujian menunjukkan titik nyala sebesar 320°C, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu ≥ 232°C.

5. Titik Bakar Aspal

Titik bakar diperoleh pada saat aspal menghasilkan percikan api selama ± 5 detik. Hasil pengujian menunjukkan titik bakar sebesar 330°C, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu ≥ 232°C.

6. Titik Lembek Aspal

Titik lembek aspal ditentukan pada kondisi saat aspal mulai melunak atau menurun hingga menyentuh bola baja. Parameter ini menggambarkan batas suhu maksimum yang masih dapat ditahan oleh aspal sebelum kehilangan kekuatan. Hasil pengujian menunjukkan nilai titik lembek sebesar 48°C, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu ≥ 48°C.

7. Kelarutan dalam *TCE*

Pengujian kelarutan aspal dalam *Trichloroethylene* (TCE) mengukur persentase aspal yang dapat larut dalam pelarut tersebut. Pada penelitian ini, nilai kelarutan aspal yang diperoleh adalah 99,524%, yang telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu ≥ 99%.

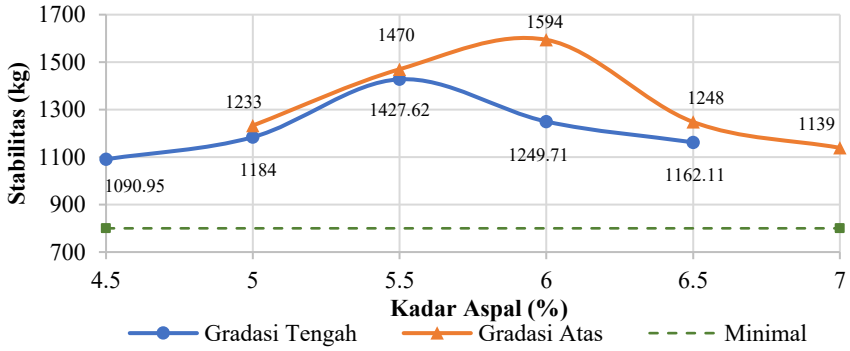
5.2.4 Karakteristik *Marshall* Campuran *Superpave* dengan Bahan Ikat Pen 60/70 untuk Mencari KAO pada Berbagai Jenis Gradasi

Kajian karakteristik Marshall Standard dalam menentukan nilai KAO pada campuran Superpave gradasi atas maupun gradasi tengah dengan bahan pengikat Pen 60/70 secara detail dapat disajikan sebagai berikut.

1. Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas adalah kemampuan lapisan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas hingga terjadi deformasi atau kelelahan plastis. Besarnya nilai stabilitas dipengaruhi oleh kadar aspal, yang akan meningkat seiring penambahan kadar aspal hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun apabila kadar aspal melebihi

batas optimum tersebut. Berikut grafik perbandingan nilai stabilitas pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas Campuran *Superpave*

Berdasarkan Gambar 5.3, terlihat bahwa nilai stabilitas pada gradasi tengah yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 berada pada rentang kadar aspal 4,5%–6,5%, sedangkan untuk gradasi atas berada pada rentang kadar aspal 5%–7%. Nilai stabilitas pada gradasi tengah mengalami peningkatan dari 1090,95 kg pada kadar aspal 4,5% menjadi 1427,63 kg pada kadar aspal 5,5%, sebelum akhirnya menurun menjadi 1162,11 kg pada kadar aspal 6,5%.

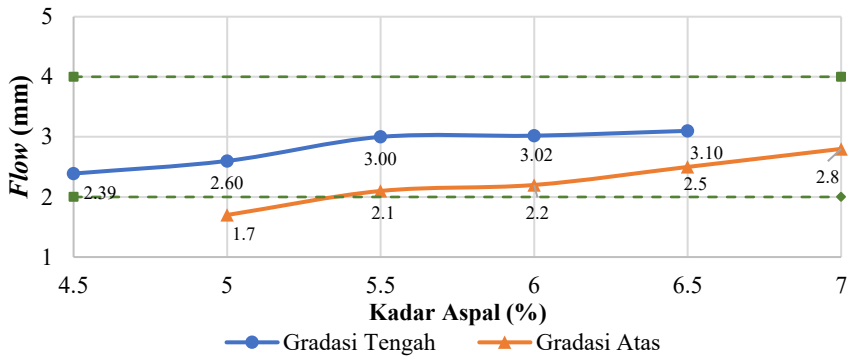
Sementara itu, gradasi atas menunjukkan tren peningkatan stabilitas yang lebih signifikan, yaitu dari 1233 kg pada kadar aspal 5% hingga mencapai nilai maksimum sebesar 1594 kg pada kadar aspal 6%, kemudian mengalami penurunan menjadi 1248 kg pada kadar aspal 6,5% dan 1139 kg pada kadar aspal 7%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kedua gradasi, nilai stabilitas meningkat seiring bertambahnya kadar aspal hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun apabila kadar aspal melebihi batas optimum tersebut.

Jika dibandingkan, gradasi atas memiliki nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan gradasi tengah pada setiap kadar aspal. Hal ini mengindikasikan bahwa gradasi atas memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap deformasi akibat beban lalu lintas. Nilai stabilitas optimum pada gradasi tengah tercapai pada kadar aspal 5,5% sebesar 1427,62 kg, sedangkan pada gradasi atas optimum dicapai pada kadar aspal yaitu 6%, dengan nilai 1594 kg.

Perbedaan ini disebabkan oleh distribusi ukuran partikel agregat pada gradasi atas yang lebih rapat, sehingga mampu menghasilkan ikatan yang lebih kuat antar partikel dengan aspal sebagai pengikat. Kadar aspal yang melebihi titik optimum cenderung menyebabkan lapisan perkerasan menjadi terlalu plastis dan rentan terhadap alur (*rutting*) serta kerusakan struktural lainnya.

2. Kelelehan (*Flow*)

Flow merupakan besaran deformasi yang terjadi akibat pembebanan hingga mencapai batas keruntuhan, yang dinyatakan dalam satuan mm atau 0,01 inci. Gambar 5.4 memperlihatkan grafik perbandingan nilai flow pada berbagai tipe gradasi dan variasi kadar aspal.



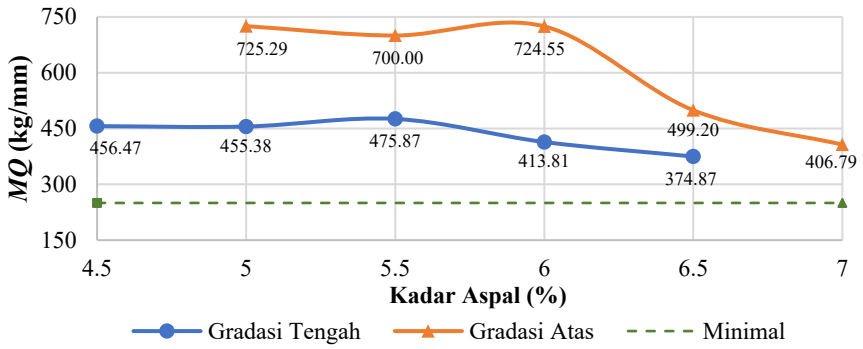
Gambar 5.4 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow* Campuran *Superpave*

Berdasarkan Gambar 5.4, terlihat bahwa pada kedua jenis gradasi tengah dan gradasi atas nilai *flow* mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal. Pada gradasi tengah, nilai *flow* meningkat dari 2,39 mm pada kadar aspal 4,5% menjadi 3,10 mm pada kadar aspal 6,5%. Sementara pada gradasi atas, nilai flow bertambah dari 1,70 mm pada kadar aspal 5,0% menjadi 2,80 mm pada kadar aspal 7,0%. Peningkatan nilai *flow* ini disebabkan oleh bertambahnya lapisan film aspal yang menyelimuti butiran agregat. Semakin tebal lapisan aspal, campuran menjadi lebih plastis dan mampu mengalami deformasi yang lebih besar sebelum pecah. Namun, apabila kadar aspal terlalu tinggi, sifat plastis yang berlebihan dapat menurunkan kekuatan struktural campuran dan meningkatkan risiko terjadinya deformasi permanen (*rutting*) di lapangan.

Dari hasil yang diperoleh, terlihat bahwa gradasi atas secara umum memiliki nilai *flow* yang lebih rendah dibandingkan gradasi tengah pada kadar aspal yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa struktur susunan butiran pada gradasi atas mampu memberikan ikatan antar-agregat yang lebih kuat, sehingga deformasi plastis yang terjadi sebelum keruntuhan menjadi lebih kecil. Dalam perencanaan campuran, nilai *flow* yang baik adalah yang berada dalam rentang tertentu sesuai spesifikasi. Nilai *flow* yang terlalu rendah menunjukkan campuran bersifat kaku dan rentan retak, sedangkan nilai *flow* yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu plastis dan kurang stabil. Oleh karena itu, penentuan kadar aspal optimum menjadi langkah penting untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan, fleksibilitas, dan ketahanan terhadap deformasi.

3. *Marshall Quotient* (*MQ*)

Marshall Quotient (*MQ*) merupakan parameter yang menggambarkan rasio antara nilai stabilitas terhadap nilai *flow* pada campuran aspal. Nilai ini digunakan untuk menilai tingkat kekakuan atau kelenturan campuran perkerasan. Semakin tinggi nilai *MQ*, campuran akan bersifat lebih kaku, sedangkan nilai *MQ* yang rendah menunjukkan campuran lebih lentur. Kekakuan yang optimal diperlukan untuk menjaga kestabilan lapisan perkerasan, namun tetap mempertahankan kelenturan agar dapat menahan deformasi akibat beban lalu lintas.. Berikut grafik nilai *MQ*. Didapatkan hasil *MQ* dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut.



Gambar 5.5 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *MQ* Campuran *Superpave*

Berdasarkan Gambar 5.5, dapat diamati bahwa untuk gradasi tengah, nilai *MQ* cenderung stabil pada kadar aspal 4,5% hingga 5,5% dengan kisaran nilai

456,47 kg/mm hingga 475,87 kg/mm. Setelah itu, nilai MQ menurun pada kadar aspal 6% dan kadar aspal 6,5%, masing-masing sebesar 413,81 kg/mm dan 374,87 kg/mm. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan aspal berlebih pada gradasi tengah mengakibatkan meningkatnya nilai flow lebih signifikan dibanding peningkatan stabilitas, sehingga rasio MQ menurun.

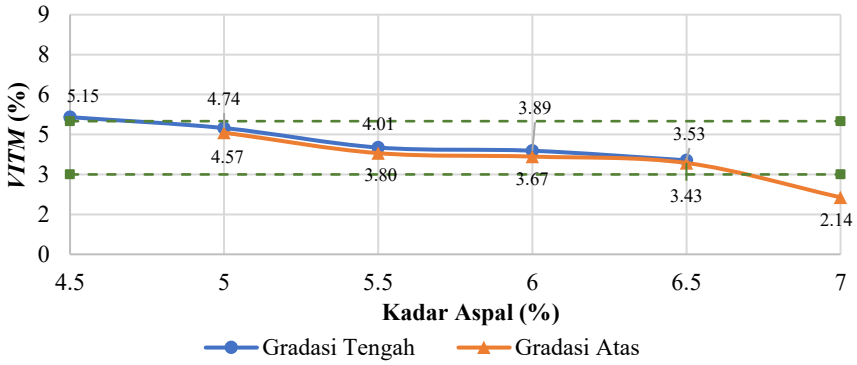
Sementara itu, pada gradasi atas, nilai MQ terlihat lebih tinggi secara keseluruhan, dengan puncak pada kadar aspal 6% sebesar 724,55 kg/mm. Nilai MQ yang tinggi pada gradasi ini mengindikasikan campuran yang relatif kaku. Namun, penurunan tajam terjadi setelah kadar aspal lebih dari 6%, yaitu pada 6,5% (499,20 kg/mm) dan 7% (406,79 kg/mm). Fenomena ini selaras dengan teori bahwa kandungan aspal yang terlalu tinggi dapat mengurangi kekakuan akibat terbentuknya lapisan aspal berlebih di sekitar agregat, yang mempermudah pergerakan partikel dan meningkatkan nilai *flow*.

Secara teoritis, nilai *MQ* optimal tercapai ketika peningkatan kadar aspal dapat menambah stabilitas tanpa menaikkan flow secara berlebihan. Apabila kadar aspal melebihi titik optimum, film aspal yang terlalu tebal akan bertindak sebagai pelumas, mengurangi gaya antar butir agregat, sehingga menurunkan kekakuan campuran. Hal ini menguatkan konsep keseimbangan antara stabilitas dan kelenturan yang menjadi tujuan desain campuran aspal. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan kadar aspal optimum sangat penting dalam mencapai keseimbangan sifat mekanis campuran. Kadar aspal yang terlalu rendah dapat mengakibatkan campuran rapuh dan mudah retak, sedangkan kadar yang terlalu tinggi dapat menurunkan kekakuan dan memperbesar potensi deformasi permanen.

4. *Void in the Total Mix* (*VITM*)

Voids in Total Mix (*VITM*) atau rongga udara dalam campuran beraspal merupakan parameter penting yang menggambarkan persentase volume udara yang masih tertinggal di dalam campuran aspal–agregat setelah mengalami proses pemadatan. Secara fisik, *VITM* menunjukkan bagian dari volume total campuran yang tidak terisi oleh agregat maupun aspal, melainkan berisi udara. Keberadaan rongga udara ini bukanlah suatu cacat, melainkan diperlukan dalam batas tertentu

untuk menjamin kinerja campuran aspal di lapangan. Berikut adalah hasil dari nilai *VITM* pada Gambar 5.6.



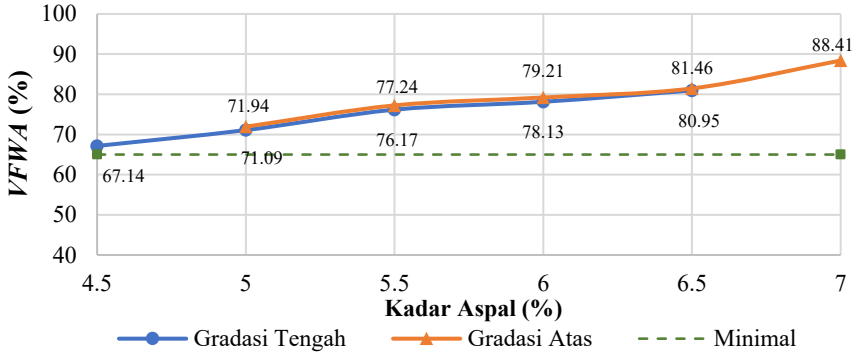
Gambar 5.6 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM* Campuran *Superpave*

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.6, terlihat bahwa nilai *VITM* menunjukkan pola penurunan seiring peningkatan kadar aspal. Pada kadar aspal yang sama, campuran dengan gradasi atas cenderung memiliki nilai *VITM* lebih rendah dibandingkan gradasi tengah. Kondisi ini disebabkan oleh proporsi agregat dalam gradasi tengah yang mengandung lebih sedikit agregat halus dan lebih banyak agregat kasar. Dominasi agregat kasar mengakibatkan distribusi butiran menjadi kurang merata, karena partikel-partikel tersebut tidak dapat saling mengisi secara rapat, sehingga menghasilkan volume rongga yang lebih besar.

Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, kisaran nilai *VITM* yang dipersyaratkan adalah 3% – 5%. Berdasarkan grafik, gradasi tengah tidak memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 4,5%, sedangkan gradasi atas keluar dari batas spesifikasi ketika kadar aspal mencapai 7%. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan kadar aspal yang terlalu tinggi dapat membuat campuran menjadi terlalu rapat, sehingga rongga udara berkurang di bawah batas minimum. Sebaliknya, kadar aspal yang terlalu rendah menyebabkan rongga udara melampaui batas maksimum karena ruang antar agregat tidak terisi dengan optimal. Oleh sebab itu, diperlukan penentuan kadar aspal optimum agar nilai *VITM* tetap berada dalam kisaran yang dipersyaratkan, sehingga kinerja perkerasan jalan dapat terjaga dengan baik.

5. *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*)

VFWA adalah persentase rongga dalam campuran yang terisi oleh aspal. Parameter ini berperan penting terhadap tingkat kerapatan campuran serta memengaruhi sifat elastis dan kekuatan campuran, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap stabilitas dan ketahanan perkerasan. Nilai *VFWA* yang terlalu besar dapat memicu terjadinya *bleeding*, sedangkan nilai yang terlalu rendah berpotensi menimbulkan kondisi *porous*. Hubungan antara kadar aspal dan nilai *VFWA* pada campuran *Superpave* untuk kedua jenis gradasi ditampilkan pada Gambar 5.7.



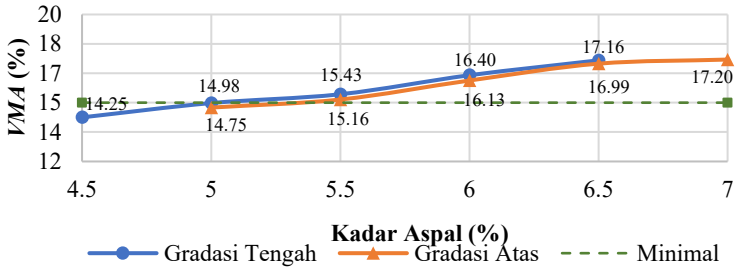
Gambar 5.7 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VFWA* Campuran *Superpave*

Berdasarkan Gambar 5.7, terlihat bahwa nilai *VFWA* pada kedua jenis gradasi menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal. Untuk gradasi tengah, nilai *VFWA* meningkat dari 67,14% pada kadar aspal 4,5% menjadi 71,09% pada kadar aspal 5%, kemudian naik menjadi 76,17% pada 5,5%, 78,13% pada 6%, dan mencapai 80,95% pada 6,5%. Sementara itu, pada gradasi atas, nilai *VFWA* juga mengalami kenaikan dari 71,94% pada kadar aspal 5% menjadi 77,24% pada 5,5%, kemudian meningkat menjadi 79,21% pada 6%, 81,46% pada 6,5%, dan mencapai nilai tertinggi 88,41% pada kadar aspal 7%. Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, kisaran nilai *VFWA* yang dipersyaratkan adalah ≥ 65%. Berdasarkan data, gradasi tengah berada dalam rentang spesifikasi pada kadar aspal 4,5%–6,5%. Untuk gradasi atas, nilai *VFWA* memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 5%–7%.

Kondisi nilai *VFWA* yang terlalu tinggi, seperti pada kadar aspal 7% untuk gradasi atas (88,41%), dapat berpotensi menimbulkan *bleeding* karena kelebihan aspal mengisi hampir seluruh rongga antar agregat, sehingga mengurangi stabilitas campuran. Sebaliknya, kadar aspal yang rendah seperti 4,5% pada gradasi tengah (67,14%) masih memenuhi spesifikasi, namun jika nilainya mendekati batas bawah, risiko *porous* meningkat karena rongga antar agregat tidak terisi optimal oleh aspal. Oleh karena itu, penentuan kadar aspal optimum menjadi penting untuk memastikan nilai *VFWA* berada pada kisaran yang dipersyaratkan dan menjaga kinerja perkerasan jalan tetap optimal.

6. *Void in Mineral Agregate* (*VMA*)

VMA merupakan persentase volume rongga udara yang terdapat di antara butiran agregat pada campuran aspal setelah melalui proses pemadatan. *VMA* dapat diartikan sebagai ruang yang tersedia untuk menampung aspal sekaligus rongga udara yang dibutuhkan dalam struktur campuran aspal-agregat. Grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *VMA* ditunjukkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *VMA* Campuran *Superpave*

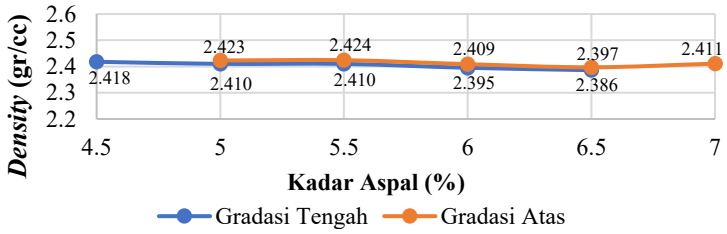
Berdasarkan Gambar 5.8, terlihat bahwa nilai *VMA* pada kedua jenis gradasi menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal. Untuk gradasi tengah, nilai *VMA* meningkat dari 14,25% pada kadar aspal 4,5% menjadi 14,98% pada 5%, kemudian naik menjadi 15,43% pada 5,5%, 16,40% pada 6%, dan mencapai 17,16% pada kadar aspal 6,5%. Sedangkan pada gradasi atas, nilai *VMA* juga mengalami kenaikan dari 14,75% pada kadar aspal 5% menjadi 15,16% pada 5,5%, kemudian meningkat ke 16,13% pada 6%, 16,99% pada 6,5%, dan 117,20%

pada kadar aspal 7%. Mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, nilai *VMA* minimum yang dipersyaratkan adalah ≥ 15% untuk campuran beraspal panas. Dari hasil ini, gradasi tengah belum memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 4,5% (14,25%) dan 5% (14,98%) namun mulai memenuhi pada kadar aspal ≥5,1%. Sementara gradasi atas tidak memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 5% (14,75%), namun mulai memenuhi pada kadar aspal ≥5,5%.

Peningkatan nilai *VMA* dengan bertambahnya kadar aspal disebabkan oleh semakin banyaknya aspal yang masuk ke dalam rongga antar butiran agregat, sehingga volume total rongga dalam campuran meningkat. Secara umum, tren data menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar aspal yang digunakan, semakin besar nilai *VMA* pada kedua gradasi. Hal ini sejalan dengan teori desain campuran beraspal, di mana penambahan kadar aspal dapat mengurangi kepadatan agregat sehingga rongga mineral *(VMA*) meningkat. Peningkatan nilai *VMA* yang melebihi batas minimal 15% menandakan bahwa campuran tersebut memiliki ruang yang cukup untuk mengakomodasi aspal dan udara, sehingga dapat memberikan keseimbangan antara kekuatan, durabilitas, dan fleksibilitas lapisan perkerasan.

7. *Density*

Nilai *density* merepresentasikan berat per satuan volume yang mencerminkan tingkat kepadatan pada campuran agregat beraspal. Peningkatan nilai *density* menandakan campuran memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan beban, karena berkurangnya rongga di dalam campuran membuatnya lebih rapat dan kedap terhadap udara maupun air, sehingga proses oksidasi menjadi lebih sulit terjadi. Hubungan antara kadar aspal dan nilai density pada campuran *Superpave* untuk kedua jenis gradasi ditunjukkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Hubungan antara Kadar Aspal dan Nilai *Density* Campuran *Superpave*

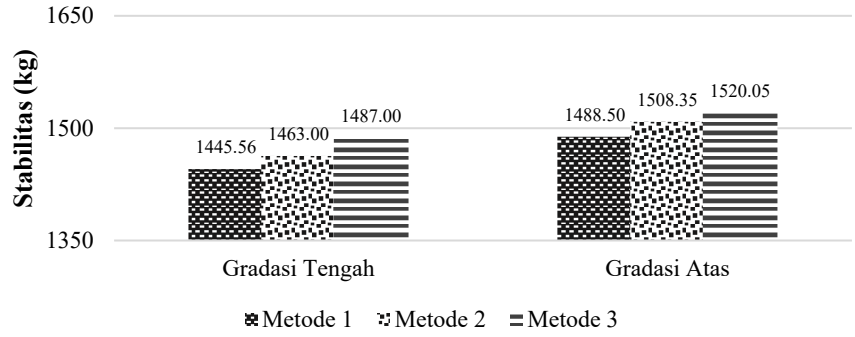
Berdasarkan Gambar 5.9, hubungan antara kadar aspal dan *density* campuran *Superpave* menunjukkan pola yang mirip pada gradasi tengah dan gradasi atas. Nilai *density* tertinggi dicapai pada gradasi atas kadar aspal 5,5% yaitu 2,424 gr/cc, kemudian mengalami penurunan pada kadar aspal yang lebih tinggi. Pada kadar rendah, *density* juga lebih rendah akibat ikatan antar agregat belum optimal, sedangkan pada kadar tinggi, penurunan *density* disebabkan oleh kelebihan aspal yang mengurangi kepadatan efektif campuran.

5.2.5 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Kinerja Campuran *Superpave* pada KAO berdasarkan Jenis Gradasi

Peninjauan pengaruh metode pencampuran terhadap jenis campuran gradasi *Superpave* pada gradasi atas dan gradasi tengah sebagai berikut.

1. Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas merupakan kemampuan lapisan perkerasan untuk menahan beban lalu lintas hingga terjadi deformasi atau kelelahan plastis. Nilai stabilitas dipengaruhi oleh kadar aspal, yang cenderung meningkat hingga mencapai kadar optimum, kemudian menurun apabila kadar aspal melebihi batas tersebut. Grafik pada Gambar 5.10 memperlihatkan pengaruh perbedaan metode pencampuran terhadap nilai stabilitas.



Gambar 5.10 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai Stabilitas pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.10, terlihat bahwa campuran *Superpave* dengan gradasi atas memiliki nilai stabilitas lebih tinggi dibandingkan dengan gradasi tengah. Peningkatan stabilitas ini dipengaruhi oleh komposisi gradasi atas yang

mengandung proporsi agregat kasar lebih sedikit, sedangkan agregat halus dan filler lebih dominan. Kondisi ini memungkinkan partikel agregat saling mengunci dengan lebih baik dan meminimalkan terbentuknya rongga udara berlebih. Temuan ini sejalan dengan penelitian Hadi, dkk (2024) yang menyatakan bahwa campuran gradasi atas pada metode *Superpave* cenderung menghasilkan stabilitas lebih tinggi dibandingkan campuran gradasi tengah, sehingga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban lalu lintas.

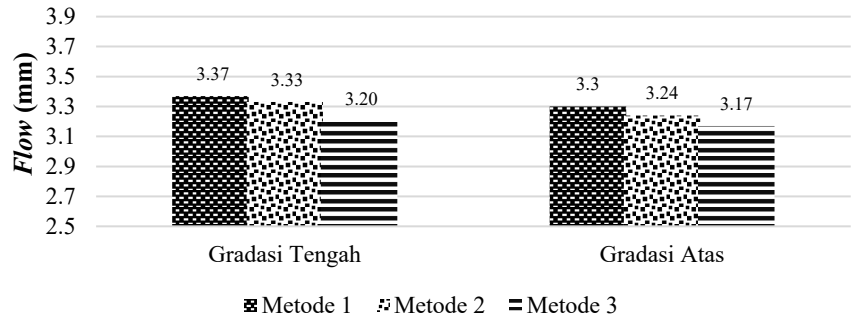
Selain itu, dari perbandingan metode pencampuran pada Gambar 5.10, diketahui bahwa penggunaan Secara umum, metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa metode bertahap mampu meningkatkan kinerja stabilitas campuran, sehingga lapisan perkerasan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap beban lalu lintas. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada metode bertahap 3, yaitu sebesar 1520 kg untuk gradasi atas dan 1487 kg untuk gradasi tengah, yang keduanya telah melampaui persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018 (>800 kg). Hasil ini konsisten dengan penelitian Kok dan Kuloglu (2011) yang menunjukkan bahwa metode bertahap mampu mengurangi rongga udara dan rongga antar-agregat, sehingga meningkatkan nilai stabilitas campuran.

Pada gambar diatas didapatkan hasil gradasi atas dengan metode 3 paling tinggi yaitu 1520,35, metode 1 didapatkan hasil 1488,50 dan metode 2 sebesar 1508,35. Dari hasil tersebut metode 1 terhadap metode 3 memiliki selisih persen kenaikan sebesar 2,08% dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 0,77%. Hasil gradasi tengah juga menunjukkan hal kenaikan persen yang sama yaitu untu metode 3 sebesar 1487, metode 1 1445,56 dan metode 2 sebesar 1463. Dari hasil tersebut didapatkan persen kenaikan antara metode 1 terhadap metode 3 sebesar 2,79%, dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 1,61%. Hal ini menandakan campuran bergradasi *Superpave* dengan menggunakan pencampuran metode bertahap 3 lebih baik dibandingkan metode konvensional dan bertahap 2.

2. Kelelehan (*Flow*)

Flow merupakan besaran deformasi yang terjadi akibat pembebanan hingga mencapai batas keruntuhan, yang dinyatakan dalam satuan mm atau 0,01 inci.

Berikut adalah grafik pengaruh metode pencampuran terhadap nilai *flow* pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *Flow* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.11, terlihat bahwa nilai *Flow* pada campuran *Superpave* baik untuk gradasi tengah maupun gradasi atas mengalami penurunan seiring perubahan metode pencampuran dari Metode 1 menuju Metode 3. Pada gradasi tengah, nilai *Flow* tercatat sebesar 3,37 mm pada Metode 1, menurun menjadi 3,33 mm pada Metode 2, dan mencapai nilai terendah 3,20 mm pada Metode 3. Sementara itu, pada gradasi atas, nilai *Flow* menunjukkan pola serupa, yaitu 3,30 mm pada Metode 1, turun menjadi 3,24 mm pada Metode 2, dan mencapai 3,17 mm pada Metode 3.Penurunan nilai *Flow* tersebut menunjukkan bahwa metode pencampuran yang lebih terkendali dan bertahap mampu menghasilkan campuran dengan struktur internal yang lebih rapat dan stabil, sehingga deformasi plastis akibat pembebanan dapat diminimalkan.

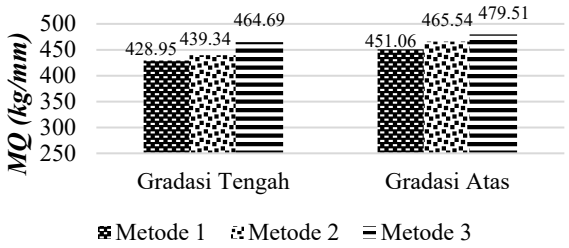
Penelitian ini mendapatkan perbandingan nilai *Flow* antara gradasi atas dan gradasi tengah dimana hasil gradasi atas lebih kecil dibandingkan dengan gradasi tengah yang hasilnya menunjukkan bahwa gradasi atas lebih kuat terhadap deformasi. Hal ini sejalan dengan teori pengujian Marshall yang menyatakan bahwa *Flow* menggambarkan besarnya deformasi plastis yang terjadi pada saat beban maksimum tercapai. Nilai *Flow* yang lebih rendah mengindikasikan campuran yang lebih kaku dan memiliki ketahanan deformasi yang lebih baik Qasim dkk, (2017).

Dengan demikian, kecenderungan penurunan *Flow* pada Metode 3 di kedua jenis gradasi mengindikasikan bahwa proses pencampuran yang lebih optimal mampu meminimalkan rongga udara, meningkatkan ikatan antarpartikel agregat, dan pada akhirnya memperbaiki kinerja mekanis campuran terhadap beban lalu lintas. Namun secara keseluruhan, hasil dari nilai *flow* untuk campuran *Superpave* gradasi tengah dan gradasi bawah telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 yaitu 2 - 4.

Pada gambar diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 1 paling tinggi yaitu sebesar 3,37 , metode 2 didapatkan hasil 3,33 dan metode 3 sebesar 3,20. Dari hasil tersebut metode 2 terhadap metode 1 memiliki selisih persen penurunan sebesar 1,19% dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 5,04%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan hal persen selisih yang sama dan untuk nilai *flow* nya yaitu metode 1 sebesar 3,3 , metode 2 sebesar 3,24 dan metode 3 sebesar 3,17 . Dari hasil tersebut didapatkan persen selisih gradasi tengah antara metode 2 terhadap metode 1 sebesar 1,19%, dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 5,04%. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 2 terhadap 1 sebesar 1,82%, dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 3,94%. Hal ini menunjukkan campuran bergradasi *Superpave* dengan menggunakan pencampuran metode bertahap 3 lebih baik dibandingkan metode konvensional dan bertahap 2.

3. *Marshall Quotient* (*MQ*)

MQ merupakan rasio antara nilai stabilitas dan flow, yang mencerminkan tingkat kelenturan campuran. Grafik pada Gambar 5.12 memperlihatkan pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *MQ*.



Gambar 5.12 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *MQ* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.12, dapat diamati bahwa campuran *Superpave* dengan gradasi atas memiliki nilai *Marshall Quotient* (MQ) yang lebih tinggi dibandingkan dengan gradasi tengah. Tingginya nilai MQ pada gradasi atas menunjukkan bahwa kombinasi agregat pada gradasi tersebut mampu membentuk sistem penguncian antar butiran (*interlocking*) yang lebih optimal. Kondisi ini berdampak pada peningkatan kapasitas stabilitas campuran sekaligus menekan potensi terjadinya deformasi plastis di bawah pengaruh beban lalu lintas.

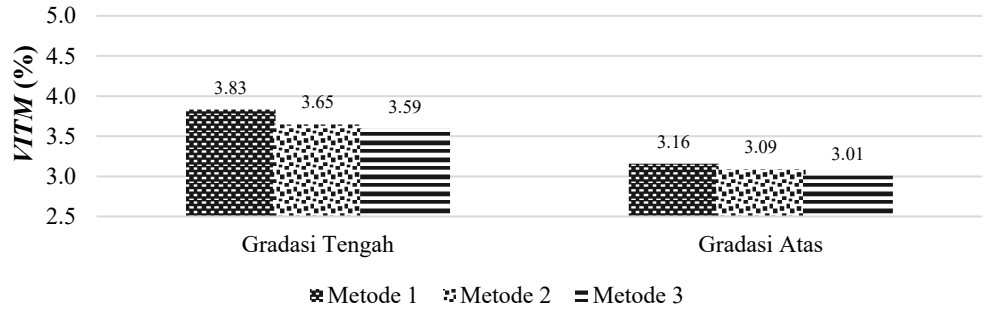
Temuan ini sejalan dengan penelitian Wahyudi (2011), yang menyatakan bahwa campuran *Superpave* dengan gradasi atas menunjukkan karakteristik mekanis yang lebih unggul dibandingkan gradasi tengah, khususnya dalam rasio stabilitas terhadap deformasi. Nilai *MQ* yang tinggi mencerminkan kemampuan campuran untuk mempertahankan stabilitas tinggi dengan nilai *flow* yang relatif rendah, sehingga menghasilkan lapisan perkerasan yang lebih kaku dan tahan terhadap deformasi. Selain perbedaan gradasi, data pada Gambar 5.12 juga menunjukkan bahwa penerapan metode pencampuran bertahap 2 dan bertahap 3 menghasilkan nilai *MQ* yang lebih besar dibandingkan dengan metode konvensional. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip pemadatan dan distribusi material. Pada metode bertahap, proses pencampuran memungkinkan distribusi aspal dan agregat yang lebih merata, serta menciptakan susunan butiran yang lebih padat dengan jumlah rongga udara yang lebih sedikit. Keadaan tersebut berimplikasi pada meningkatnya stabilitas campuran tanpa menyebabkan kenaikan *flow* yang tinggi.

Hasil ini konsisten dengan studi Iqbal dan Fauziah (2023), yang menemukan bahwa Metode pencampuran bertahap terbukti menghasilkan nilai MQ yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Peningkatan tersebut disebabkan oleh terbentuknya struktur internal campuran yang lebih padat dan homogen, yang pada akhirnya meningkatkan ketahanan terhadap beban lalu lintas berat serta mengurangi kerentanan terhadap deformasi plastis. Dengan demikian, penerapan metode bertahap pada desain campuran *Superpave* dapat direkomendasikan untuk kondisi lalu lintas berintensitas tinggi dan beban berat, guna menjamin kinerja struktural lapisan perkerasan dalam jangka panjang.

Pada hasil *MQ* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 3 paling tinggi yaitu sebesar 428,95 , metode 2 didapatkan hasil 439,34, dan metode 3 sebesar 464,69. Dari hasil tersebut metode 1 terhadap metode 3 memiliki persen selisih sebesar 7,69% dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 5,45%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan hal tren kenaikan yang sama dan untuk nilai *MQ* nya yaitu metode 1 sebesar 451,06 , metode 2 sebesar 465,54 dan metode 3 sebesar 479,51. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 1 terhadap metode 3 sebesar 5,93%, dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 2,91%.

4. *Void in the Total Mix* (*VITM*)

VITM merupakan persentase rongga udara yang terdapat di dalam keseluruhan campuran agregat dan aspal. Besar kecilnya nilai *VITM* berhubungan erat dengan kemampuan campuran untuk menahan deformasi plastis. Nilai *VITM* yang terlalu tinggi akan menghasilkan campuran yang lebih berpori, sehingga mudah mengalami deformasi plastis. Sebaliknya, nilai *VITM* yang terlalu rendah dapat menyebabkan campuran menjadi kurang stabil. Gambar 5.13 berikut menyajikan *bar chart* yang menunjukkan pengaruh perbedaan metode pencampuran terhadap nilai *VITM*.



Gambar 5.13 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VITM pada Campuran Superpave Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.13, nilai *Void In Total Mix* (*VITM*) menurun dari Metode 1 ke Metode 3, baik pada gradasi tengah (3,83% → 3,59%) maupun gradasi

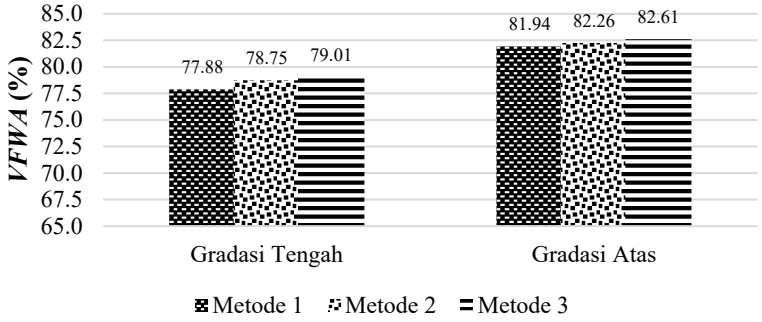
atas (3,16% → 3,01%). Penurunan ini menunjukkan bahwa pencampuran bertahap menghasilkan susunan agregat-aspal lebih rapat dengan rongga udara lebih sedikit. *VITM* yang terlalu tinggi membuat campuran porus dan rentan deformasi plastis, sedangkan nilai terlalu rendah meningkatkan risiko *bleeding* dan deformasi permanen akibat over kompaksi (Alwi, dkk 2021).

Temuan Pokorski, dkk (2021) juga menunjukkan bahwa *VITM* rendah dapat memperbesar *rutting* pada uji kompresi siklik. Dengan demikian, Metode 3 dinilai mampu mencapai keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas, di mana struktur padat tetap mempertahankan rongga udara minimal untuk mendukung stabilitas sekaligus mengurangi potensi deformasi plastis di bawah beban lalu lintas.

Pada hasil *VITM* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 1 paling tinggi yaitu sebesar 3,83, metode 2 didapatkan hasil 3,65, dan metode 3 sebesar 3,59. Dari hasil tersebut metode 2 terhadap metode 1 memiliki persen selisih sebesar 4,87% dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 6,26%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *VITM* yaitu metode 1 sebesar 3,16, metode 2 sebesar 3,09 dan metode 3 sebesar 3,01. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 2 terhadap metode 1 sebesar 2,22%, dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 4,65%.

5. *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*)

Void Filled With Asphalt (*VFWA*) merupakan persentase volume rongga dalam campuran yang terisi oleh material aspal. Parameter ini memegang peran penting dalam menentukan tingkat kekedapan (*impermeability*) dan sifat elastis dari campuran aspal, yang pada akhirnya akan memengaruhi stabilitas serta umur layan perkerasan. Nilai *VFWA* yang terlalu tinggi berpotensi memicu fenomena *bleeding* akibat kelebihan aspal, sedangkan nilai yang terlalu rendah dapat mengakibatkan campuran menjadi lebih porous dan rentan terhadap kerusakan akibat infiltrasi air maupun beban lalu lintas. Hubungan antara kadar aspal dan nilai *VFWA* pada campuran *Superpave* untuk kedua jenis gradasi dapat diamati pada Gambar 5.14.



Gambar 5.14 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *VFWA* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.14, nilai *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*) pada campuran Superpave menunjukkan bahwa gradasi atas memiliki kisaran lebih tinggi (81,94–82,61%) dibandingkan gradasi tengah (77,88–79,01%). Hal ini menunjukkan distribusi agregat pada gradasi atas lebih efektif dalam mengisi rongga dengan aspal, sehingga meningkatkan kekedapan, elastisitas, dan potensi stabilitas campuran.

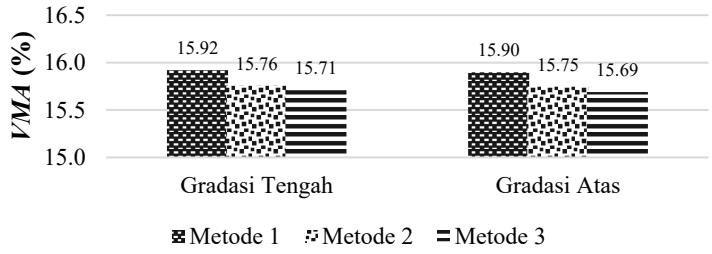
Metode pencampuran bertahap (Metode 2 dan 3) cenderung menghasilkan VFWA lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Metode 1), sejalan dengan temuan Maqbool, dkk (2022), bahwa pengadukan bertahap meningkatkan homogenitas dan ketebalan lapisan aspal pada agregat. Meskipun nilai VFWA yang tinggi mengindikasikan pengisian rongga yang baik, perlu pengendalian agar tidak melebihi batas optimum untuk menghindari *bleeding*. Hasil ini selaras dengan penelitian Hariyadi dan Dewi., (2024) yang menekankan pentingnya kombinasi gradasi agregat dan metode pencampuran tepat untuk mencapai VFWA ideal (70–80%) dan memastikan kinerja perkerasan jangka panjang. Pada penelitian ini, gradasi atas dengan metode pencampuran bertahap, khususnya Metode 3, direkomendasikan sebagai kombinasi paling optimal.

Pada hasil *VFWA* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 3 paling tinggi yaitu sebesar 79,01, metode 2 didapatkan hasil 78,75, dan metode 1 sebesar 77,88. Dari hasil tersebut metode 1 terhadap metode 3 memiliki persen selisih sebesar 1,43% dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 0,33%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *VFWA* yaitu metode 1

sebesar 81,94, metode 2 sebesar 82,26 dan metode 3 sebesar 82,61. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 1 terhadap metode 3 sebesar 0,82%, dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 0,43%.

6. *Void in Mineral Agregat* (*VMA*)

VMA adalah persentase rongga yang terdapat di antara butiran agregat pada campuran aspal setelah dipadatkan. Rongga ini berperan sebagai ruang untuk menampung aspal sekaligus menyediakan udara yang diperlukan dalam campuran. Grafik pada Gambar 5.15 menunjukkan pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *VMA.*



Gambar 5.15 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *VMA* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.15, terlihat bahwa nilai *Voids in Mineral Aggregate* (*VMA*) pada campuran *Superpave* cenderung mengalami sedikit penurunan seiring perubahan metode pencampuran dari Metode 1 (konvensional) ke Metode 3 (bertahap penuh). Pada gradasi tengah, *VMA* menurun dari 15,92% menjadi 15,71%, sedangkan pada gradasi atas penurunan terjadi dari 15,90% menjadi 15,69%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa metode pencampuran berpengaruh terhadap kepadatan struktur internal campuran.

Secara teknis, *VMA* menggambarkan total volume rongga di antara butiran agregat dalam campuran padat yang dapat diisi oleh aspal dan udara. Nilai *VMA* yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan adanya ruang berlebih yang berpotensi menurunkan kekuatan struktural, sedangkan nilai yang terlalu rendah dapat mengurangi kapasitas campuran untuk menampung aspal, sehingga mengganggu daya ikat dan elastisitasnya (Nazir, dkk 2022). Dengan demikian, pengendalian *VMA* menjadi krusial untuk mencapai kinerja lapangan yang optimal.

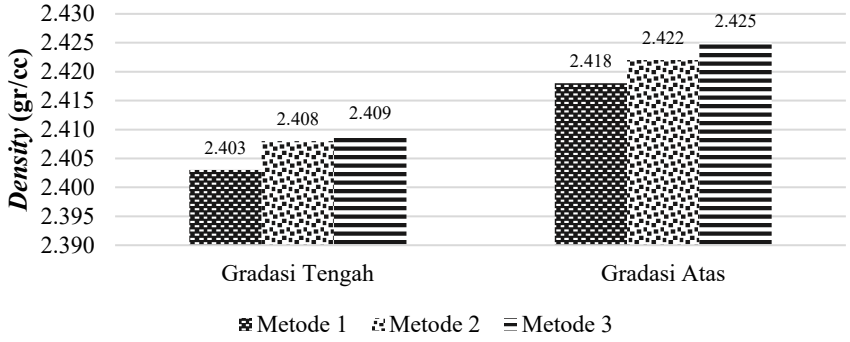
Penurunan nilai VMA pada metode pencampuran bertahap berhubungan dengan proses distribusi agregat dan aspal yang lebih merata, sehingga mengurangi volume rongga antar butir. Hal ini sejalan dengan temuan Zhang, dkk (2022), yang menyatakan bahwa pencampuran bertahap dapat meningkatkan tingkat kepadatan dan mengoptimalkan pengisian rongga oleh aspal.

Meskipun demikian, nilai *VMA* yang dihasilkan pada seluruh metode masih berada dalam rentang yang direkomendasikan oleh spesifikasi *Superpave* (umumnya 14%–17%), yang memastikan keseimbangan antara ketahanan terhadap deformasi permanen dan kemampuan menahan penetrasi air. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, hasil ini mengonfirmasi bahwa perubahan metode pencampuran lebih berpengaruh pada homogenitas distribusi aspal daripada secara signifikan mengubah *VMA*, namun tetap memberikan kontribusi positif terhadap kinerja jangka panjang perkerasan.

Pada hasil *VMA* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 1 paling tinggi yaitu sebesar 15,92, metode 2 didapatkan hasil 15,76, dan metode 3 sebesar 15,71. Dari hasil tersebut metode 2 terhadap metode 1 memiliki persen selisih sebesar 1,03% dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 1,32%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *VMA* yaitu metode 1 sebesar 15,90, metode 2 sebesar 15,75 dan metode 3 sebesar 15,59. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 2 terhadap metode 1 sebesar 0,94%, dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 1,30%.

7. Kepadatan (*Density*)

Densitas merupakan ukuran berat per satuan volume yang mencerminkan tingkat kepadatan campuran agregat aspal. Peningkatan nilai densitas menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan beban, karena berkurangnya rongga di dalam campuran membuatnya lebih rapat serta lebih kedap terhadap udara dan air, sehingga memperlambat proses oksidasi. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap densitas campuran *Superpave* pada kedua jenis gradasi ditunjukkan pada Gambar 5.16.



Gambar 5.16 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *Density* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.16, terlihat bahwa campuran *Superpave* dengan gradasi atas menunjukkan nilai densitas lebih tinggi dibandingkan gradasi tengah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa gradasi atas memiliki stabilitas yang lebih baik akibat sistem penguncian antarpartikel agregat yang lebih optimal. Struktur tersebut meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi akibat beban lalu lintas, sehingga risiko terjadinya *rutting* dapat diminimalkan.

Selain itu, Gambar 5.16 memperlihatkan bahwa metode pencampuran bertahap 2 dan bertahap 3 menghasilkan nilai densitas sedikit lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, meskipun perbedaannya tidak signifikan. Peningkatan tersebut diduga disebabkan oleh berkurangnya rongga antarbutir yang berkontribusi pada peningkatan densitas.

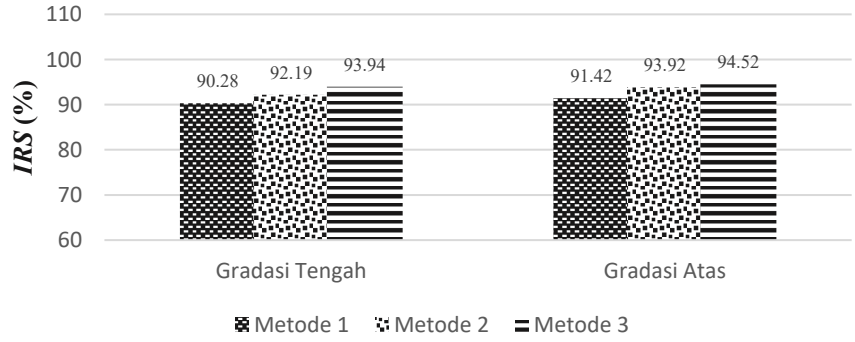
Sejalan dengan temuan Zumwari dan Edress (2016), densitas yang tinggi juga meningkatkan kekedapan campuran terhadap udara dan air, sehingga memperlambat proses oksidasi dan menjadikannya lebih sesuai untuk diterapkan di wilayah dengan kondisi cuaca ekstrem. Hasil penelitian ini konsisten dengan studi Al-Khateeb, dkk (2017) yang melaporkan bahwa campuran *Superpave* gradasi atas memiliki tingkat kepadatan yang lebih baik dibandingkan gradasi tengah.

Pada hasil *Density* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 3 paling tinggi yaitu sebesar 2,403, metode 2 didapatkan hasil 2,408, dan metode 3 sebesar 2,409. Dari hasil tersebut metode 1 terhadap metode 3 memiliki persen selisih sebesar 0,25% dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 0,04%. Hasil gradasi

atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *Density* yaitu metode 1 sebesar 2,418, metode 2 sebesar 2,422, dan metode 3 sebesar 2,425. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 1 terhadap metode 3 sebesar 0,29%, dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 0,12%.

5.2.6 Perbandingan Nilai *IRS* Campuran *Superpave* Terhadap Berbagai Metode Pencampuran berdasarkan Jenis Gradasi

Nilai *Index of Retained Strength* (*IRS*) diperoleh melalui pengujian ketahanan campuran terhadap efek perendaman, yang bertujuan untuk mengevaluasi durabilitas setelah terpapar kondisi perendaman selama 24 jam pada *water bath* bersuhu 60°C, dibandingkan dengan perendaman selama 30 menit. Perhitungan *IRS* dilakukan dengan membandingkan nilai stabilitas setelah perendaman 24 jam terhadap nilai stabilitas pada perendaman 0,5 jam, kemudian dikonversikan ke dalam bentuk persentase. Dengan metode ini, tingkat penurunan atau retensi kekuatan campuran dapat diidentifikasi secara lebih akurat. Adapun Gambar 5.17 menyajikan grafik pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *IRS* pada campuran *Superpave* gradasi tengah dan gradasi bawah.



Gambar 5.17 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *IRS* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.17, dapat diamati bahwa nilai *Index of Retained Strength* (*IRS*) pada campuran *Superpave* gradasi atas cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan gradasi tengah untuk setiap metode pencampuran yang diuji. Pada gradasi tengah, metode konvensional (Metode 1) menghasilkan nilai *IRS* sebesar 90,28%, sedangkan metode bertahap 2 (Metode 2) dan bertahap 3 (Metode

3) menunjukkan peningkatan masing-masing menjadi 92,19% dan 93,94%. Sementara itu, pada gradasi atas, nilai *IRS* Metode 1 sebesar 91,42%, Metode 2 sebesar 93,92%, dan Metode 3 mencapai nilai tertinggi, yaitu 94,52%.

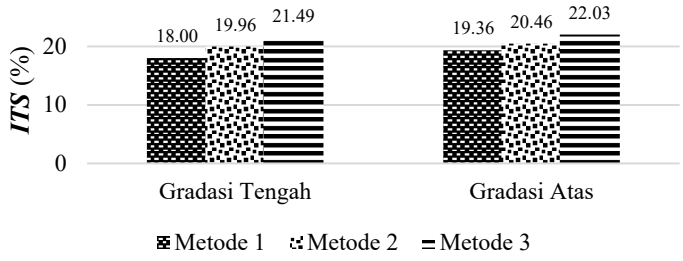
Peningkatan nilai IRS ini mengindikasikan bahwa metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan campuran yang lebih tahan terhadap penurunan stabilitas setelah mengalami perendaman jangka panjang. Hal ini dapat dikaitkan dengan distribusi aspal yang lebih merata dan ikatan antar-agregat yang lebih kuat, sehingga mengurangi kerusakan akibat intrusi air ke dalam campuran. Menurut penelitian terbaru oleh Rangan dan Tumpu (2022) metode pencampuran yang meningkatkan homogenitas material dan kepadatan struktur internal mampu mempertahankan stabilitas campuran di atas 90% setelah pengujian ketahanan air, yang menjadi indikator ketahanan terhadap *moisture damage*.

Hasil ini juga sejalan dengan temuan Raza, dkk (2022) yang melaporkan bahwa campuran aspal dengan tingkat *interlocking* agregat yang optimal serta lapisan film aspal yang seragam menunjukkan retensi kekuatan lebih dari 93%, terutama ketika digunakan pada perkerasan dengan lalu lintas berat dan kondisi lingkungan yang rentan terhadap kelembaban. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode bertahap, khususnya Metode 3, dapat direkomendasikan untuk menghasilkan campuran *Superpave* dengan ketahanan jangka panjang yang lebih baik terhadap efek perendaman dan potensi kerusakan akibat air.

Pada hasil *IRS* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 3 paling tinggi yaitu sebesar 93,94, metode 2 didapatkan hasil 92,19, dan metode 1 sebesar 90,28. Dari hasil tersebut metode 1 terhadap metode 3 memiliki persen selisih sebesar 3,89% dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 1,87%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *Density* yaitu metode 1 sebesar 91,42, metode 2 sebesar 93,92, dan metode 3 sebesar 94,52. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 1 terhadap metode 3 sebesar 3,28%, dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 0,63%.

5.2.7 Perbandingan Nilai *ITS* Campuran *Superpave* Terhadap Berbagai Metode Pencampuran berdasarkan Jenis Gradasi

Indirect Tensile Strength (*ITS*) merupakan metode pengujian yang digunakan untuk menentukan kekuatan tarik tidak langsung pada campuran aspal. Parameter ini berperan penting dalam memprediksi potensi keretakan yang mungkin terjadi akibat kegagalan tarik pada campuran, sehingga memudahkan proses evaluasi terhadap kerentanan campuran aspal terhadap retak. Gambar 5.18 menyajikan grafik yang menunjukkan pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *ITS* pada campuran *Superpave* dengan gradasi tengah dan gradasi bawah.



Gambar 5.18 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *ITS* pada Campuran *Superpave* Gradasi Atas dan Gradasi Tengah

Berdasarkan Gambar 5.18, terlihat bahwa nilai *Indirect Tensile Strength* (*ITS*) pada campuran *Superpave* dengan gradasi atas lebih tinggi dibandingkan gradasi tengah. Peningkatan ini disebabkan oleh proporsi agregat pada gradasi atas yang lebih optimal, sehingga menghasilkan campuran dengan tingkat kepadatan yang lebih baik serta kemampuan yang lebih tinggi dalam menahan gaya tarik tidak langsung. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Hadi, dkk (2024) yang menyatakan bahwa campuran *Superpave* gradasi atas memiliki kekuatan tarik yang lebih unggul, ketahanan yang lebih baik terhadap retak dan deformasi, serta kapasitas struktural yang lebih tinggi.

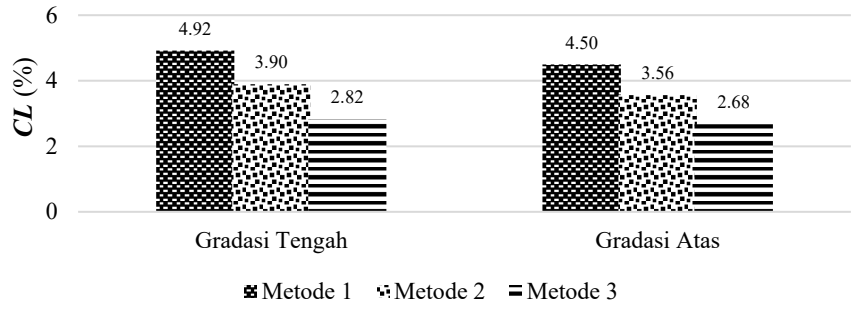
Selain itu, pada Gambar 5.18 juga terlihat bahwa penerapan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *ITS* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Hal ini mengindikasikan bahwa metode pencampuran bertahap lebih efektif dalam meningkatkan resistansi campuran terhadap potensi

keretakan akibat kegagalan tarik. Nilai *ITS* tertinggi dicapai pada gradasi atas sebesar 22,03 kg/cm², sedangkan pada gradasi tengah sebesar 21,49 kg/cm². Hasil ini sejalan dengan penelitian Yaro, dkk (2021) yang menunjukkan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap secara konsisten memberikan peningkatan nilai *ITS* dibandingkan metode konvensional pada berbagai variasi kadar campuran.

Pada hasil *ITS* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 3 paling tinggi yaitu sebesar 21,49, metode 2 didapatkan hasil 19,96, dan metode 1 sebesar 18,00. Dari hasil tersebut metode 1 terhadap metode 3 memiliki persen selisih sebesar 12,13% dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 7,14%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *ITS* yaitu metode 1 sebesar 19,36, metode 2 sebesar 20,46, dan metode 3 sebesar 22,03. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 1 terhadap metode 3 sebesar 16,25%, dan metode 2 terhadap metode 3 sebesar 7,14%.

5.2.8 Perbandingan Nilai *CL* Campuran *Superpave* Terhadap Berbagai Metode Pencampuran berdasarkan Jenis Gradasi

CL bertujuan untuk mengetahui ketahanan benda uji terhadap abrasi. Pengujian *CL* dilakukan menggunakan mesin *Loss Angeles* dengan jumlah putaran sebanyak 300 kali tanpa bola baja. Gambar 5.19 berikut ini adalah grafik pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *CL* pada campuran *Superpave* gradasi tengah dan gradasi bawah.



Gambar 5.19 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *CL* pada Campuran *Superpave* Gradasi Tengah dan Gradasi Bawah

Berdasarkan Gambar 5.19, terlihat bahwa nilai *Cantabro Loss* (*CL*) pada campuran *Superpave* gradasi atas lebih rendah dibandingkan dengan campuran gradasi tengah. Perbedaan ini disebabkan oleh rongga udara pada campuran gradasi atas yang relatif lebih kecil, sehingga menghasilkan kepadatan yang lebih tinggi dan ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan campuran gradasi tengah. Temuan ini konsisten dengan penelitian Zhang, dkk (2004) yang menyatakan bahwa penerapan campuran *Superpave* dapat menghasilkan *interlocking* antarpartikel agregat yang optimal, sehingga mampu mempertahankan integritas struktural campuran meskipun menerima beban benturan.

Selain itu, berdasarkan metode pencampurannya, terlihat bahwa campuran dengan metode bertahap menunjukkan nilai Metode bertahap menghasilkan nilai CL yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional, yang menunjukkan kemampuannya menciptakan interlocking material lebih efektif sehingga campuran tetap stabil meskipun terkena gaya benturan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Yaro, dkk (2023) yang membuktikan bahwa metode pencampuran bertahap secara konsisten menghasilkan nilai *CL* yang lebih rendah pada berbagai variasi kadar campuran. Dengan demikian, metode pencampuran bertahap dapat dikatakan lebih unggul dalam meningkatkan daya tahan dan daya lekat campuran, sekaligus memperbaiki ketahanan terhadap abrasi.

Pada hasil *CL* diatas didapatkan hasil gradasi tengah dengan metode 1 paling tinggi yaitu sebesar 4,92, metode 2 didapatkan hasil 3,90, dan metode 3 sebesar 2,82. Dari hasil tersebut metode 2 terhadap metode 1 memiliki persen selisih sebesar 20,76% dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 42,66%. Hasil gradasi atas juga menunjukkan tren yang sama dan untuk nilai *CL* yaitu metode 1 sebesar 4,50, metode 2 sebesar 3,56, dan metode 3 sebesar 2,68. Untuk gradasi atas didapatkan persen selisih antara metode 2 terhadap metode 1 sebesar 20,78%, dan metode 3 terhadap metode 1 sebesar 40,46%.

5.2.9 Rekapitulasi Perbandingan Hasil Pengujian Karakteristik Keseluruhan Campuran

Berikut ini hasil rekapitulasi pada keseluruhan campuran *Superpave* batas tengah dan batas bawah dengan berbagai metode pencampuran dapat dilihat pada Tabel 5.12 berikut ini.

Tabel 5.12 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik pada Campuran Superpave Batas Atas dan Batas Tengah

Jenis Gradasi	Metode	Pemenuhan Spesifikasi Tiap Parameter						
		Stabilitas	*Flow*	*MQ*	*VMA*	*VFWA*	*Density*	*VITM*
Batas Atas	1	√	√	√	√	√	√	√
	2	√	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	√	√	√	√	√
Batas Tengah	1	√	√	√	√	√	√	√
	2	√	√	√	√	√	√	√
	3	√	√	√	√	√	√	√

Keterangan :

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Tabel 5.12 menunjukkan bahwa seluruh parameter yang diuji telah memenuhi standar spesifikasi Bina Marga 2018. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa variasi metode pencampuran bertahap lebih efektif diterapkan pada jenis campuran *Superpave*. Adapun pengaruh perbedaan metode pencampuran terhadap kinerja campuran *Superpave* pada pengujian lainnya disajikan pada Tabel 5.13.

Tabel 5.13 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Karakteristik pada Campuran Superpave Batas Atas dan Batas Tengah

Jenis Gradasi	Metode	Pemenuhan Spesifikasi Tiap Parameter		
		ITS	*CL*	*IRS*
Batas Atas	1	√	√	√
	2	√	√	√
	3	√	√	√
Batas Tengah	1	√	√	√
	2	√	√	√
	3	√	√	√

Keterangan :
√ = Memenuhi Spesifikasi
× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Tabel 5.13 menunjukkan bahwa seluruh metode pencampuran yang diuji telah memenuhi persyaratan spesifikasi. Rincian lebih lanjut mengenai hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.14 dan Tabel 5.15.

Tabel 5.14 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Atas dengan Berbagai Metode Pencampuran

No	Pengujian	Kinerja Perkerasan			Keterangan
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
1	*VITM*	3,16	3,09	301	Metode bertahap 3 menunjukkan nilai *VITM* yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional

Lanjutan Tabel 5.14 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Atas dengan Berbagai Metode Pencampuran

No	Pengujian	Kinerja Perkerasan			Keterangan
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
					yang mengindikasikan bahwa jumlah rongga udara pada mettode 3 lebih sedikit daripada metode 1, meskipun perbedaanya tidak besar. Untuk persen selisihnya yaitu sebesar 4,65%.
2	*VFWA*	81,94	82,26	82,61	Nilai *VFWA* merepresentasikan persentase rongga yang terlapisi oleh aspal. Pada metode pencampuran bertahap 3, diperoleh nilai tertinggi dan persen selisih rata-ratanya sebesar 0,62%.
3	*VMA*	15,90	15,75	15,69	Nilai *VMA* mengindikasikan persentase rongga udara di antara butiran agregat setelah pemadatan. Metode bertahap 3 menunjukkan nilai yang relatif lebih kecil dibandingkan metode lainnya. Dengan persen selisih rata-ratanya adalah 1,12%.
4	*Flow*	3,3	3,24	3,17	Nilai *flow* mencerminkan tingkat deformasi yang terjadi pada benda uji. Pada metode bertahap 3, nilai *flow* yang dihasilkan menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan metode lainnya. Dengan rata-rata selisih 2,88%
5	Stabilitas	1488,50	1508,35	1520,05	Nilai stabilitas pada metode bertahap 3 lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, yang menandakan kemampuan yang lebih baik dalam

Lanjutan Tabel 5.14 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Atas dengan Berbagai Metode Pencampuran

No	Pengujian	Kinerja Perkerasan			Keterangan
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
					menahan beban lalu lintas. Dengan rata-rata selisih 1,42%.
6	*CL*	4,50	3,56	2,68	Nilai *CL* pada metode 3 lebih rendah dari pada metode konvensional yang mengindikasikan ketahanan terhadap keausan yang lebih baik. Dengan rata-rata selisih 30,62%.
7	*IRS*	91,42	93,92	94,52	Nilai *IRS* pada metode 3 tercatat lebih tinggi dibandingkan metode konvensional maupun metode 2. Dengan rata-rata selisih 1,92%.
8	*ITS*	19,36	20,46	22,03	Nilai *ITS* pada metode bertahap 3 juga menunjukkan peningkatan ,yang mengindikasikan bahwa metode bertahap memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gaya tarik tidak langsung. Dengan rata-rata selisih 11,69%.

Tabel 5.15 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Tengah dengan Berbagai Metode Pencampuran

No	Pengujian	Kinerja Perkerasan			Keterangan
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
1	*VITM*	3,83	3,65	3,59	Metode bertahap 3 memiliki nilai *VITM* lebih kecil dibandingkan dengan metode konvensional berarti jumlah rongga udara

Lanjutan Tabel 5.15 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Tengah dengan Berbagai Metode Pencampuran

No	Pengujian	Kinerja Perkerasan			Keterangan
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
					yang terdapat pada metode 3 lebih sedikit dibanding dengan metode 1 tetapi tidak terlalu signifikan. Dengan rata-rata selisih 5,57%.
2	*VFWA*	77,88	78,75	79,01	Nilai *VFWA* menunjukkan persen rongga yang terlapisi oleh aspal dimana untuk metode bertahap 3 memiliki nilai tertinggi tetapi tidak terlalu signifikan. Dengan rata-rata selisih 0,88%
3	*VMA*	15,92	15,76	15,71	Nilai *VMA* menunjukkan persen rongga udara antar butir agregat setelah dipadatkan, yang mana nilai metode bertahap 3 memiliki nilai terendah namun hal ini menunjukkan yang terbaik. Dengan rata-rata selisih 1,17%.
4	*Flow*	3,37	3,33	3,20	Nilai *flow* menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada benda uji. Nilai *flow* pada metode 3 memiliki nilai yang lebih baik. Dengan rata-rata selisih 3,12%.
5	Stabilitas	1445,56	1463	1487	Nilai stabilitas pada metode bertahap 3 memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan metode konvensional maupun metode 2, berarti metode 3 menandakan lebih kuat. Dengan rata-rata selisih 2,20%.

Lanjutan Tabel 5.15 Perbandingan Kinerja Campuran *Superpave* Gradasi Tengah dengan Berbagai Metode Pencampuran

No	Pengujian	Kinerja Perkerasan			Keterangan
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
6	*CL*	4,92	3,90	2,82	Nilai *CL* pada metode bertahap 3 memiliki nilai yang lebih kecil menunjukkan campuran menggunkana metode 3 jauh lebih sedikit kehancurannya yang menandakan bahwa campuran tersebut kuat. Dengan rata-rata selisih 31,71%.
7	*IRS*	90,28	92,19	93,94	Nilai *IRS* pada metode 3 mempunyai nilai tertinggi dari pada metode lainnya. Dengan rata-rata selisih 2,88%.
8	*ITS*	18,00	19,96	21,49	Nilai *ITS* pada metode bertahap 3 mempunyai nilai lebih tinggi dibandingkan dengan metode lainnya. Metode bertahap lebih kuat dan tahan gaya Tarik secara tak langsung. Dengan rata-rata selisih 9,64%.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis penelitian yang sudah dilakukan peneliti mendapatkan Kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaruh metode pencampuran terhadap parameter *Marshall*

   Metode pencampuran bertahap khususnya metode 3, terbukti menghasilkan nilai stabilitas,*flow*,dan *Marshall Quotient* yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional,serta seluruh hasil memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Dengan persen selisih rata-ratanya didapatkan sebesar 2,91%.
2. Pengaruh metode pencampuran terhadap sifat volumentrik campuran

   Metode bertahap mampu meningkatkan nilai *VFWA* dan densitas, serta menurunkan *VITM* dan *CL*, sehingga campuran menjadi lebih padat, kedap, dan tahan aus tanpa menurunkan parameter lainnya secara signifikan.Dengan persentase selisih rata-rata yang didapatkan sebesar 1,35%.
3. Pengaruh metode pencampuran terhadap ketahanan terhadap air dan keretakan

   Nilai *IRS* dan *ITS* pada metode bertahap 3 lebih tinggi dibanding metode konvensional dan bertahap 2, menunjukkan daya tahan lebih baik terhadap kerusakan akibat kelembaban serta ketahanan tarik tidak langsung yang lebih tinggi. Dengan rata-rata persentase yang didapatkan sebesar 5,80%
4. Metode pencampuran terbaik untuk campuran *Superpave* didapatkan yaitu Metode bertahap 3 pada gradasi atas direkomendasikan sebagai kombinasi optimal karena mampu memberikan kinerja struktural dan durabilitas terbaik, sesuai standar teknis dan kebutuhan lalu lintas berintensitas tinggi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil dari pengujian penelitian campuran bergradasi superpave dengan menggunakan berbagai metode pencampuran pada gradasi batas atas dan gradasi batas tengah. Maka peneliti memberikan saran sebagai berikut.

1. Penerapan metode bertahap 3 direkomendasikan pada campuran *Superpave* gradasi atas untuk meningkatkan stabilitas, densitas, dan ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembaban
2. Pengendalian parameter volumetrik seperti VITM, VMA, dan VFWA perlu dilakukan secara ketat agar tetap berada dalam rentang spesifikasi guna menjaga kinerja campuran jangka panjang.
3. Pengujian lanjutan dengan variasi suhu dan beban lalu lintas disarankan untuk memvalidasi kinerja metode pencampuran pada kondisi lapangan yang lebih beragam.
4. Pemanfaatan hasil penelitian ini sebagai acuan dalam penyusunan pedoman teknis dapat membantu meningkatkan kualitas konstruksi perkerasan jalan di Indonesia.
5. Penelitian ini menemukan bahwa campuran dengan gradasi atas lebih baik dari pada gradasi tengah hal ini bisa menjadi acuan penelitian selanjutnya untuk menggunakan gradasi atas.
6. Peneliti juga menemukan bahwa metode bertahap 3 lebih baik dari pada metode pencampuran lainnya tetapi tidak disarankan untuk penerapan dilapangan dikarenakan keterbatasan alat dan biaya yang tergolong lebih mahal.

DAFTAR PUSTAKA

Alwi, S., Putrawirawan, A. dan Hidayat, R., 2021. Pengaruh Penggunaan Abu Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Filler Terhadap Karakteristik Marshall pada Campuran Asphalt Concrete–Binder Course (AC-BC). *Jurnal Inersia*, *13*(1), pp.29-37.

Afriyanto, B., Indriyati, E.W. and Hardini, P., 2019, October. Analisis Variasi Kadar Limbah Plastik Low Density Polyethylene (LDPE) Dalam Aspal Modifikasi Terhadap Karakteristik Dasar Aspal. In *Prosiding Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi*.

Al-Khateeb, G. G., Ghuzlan, K. A., dan Al-Barqawi, M. O. 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-Khateeb, G. G., Khedaywi, T. S., dan Obaidat, T. I. 2010. *Volumetric Analysis-Based Comparison between Superpave and Marshall Mix Design Procedures*.

Brown, E. R., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim, Y. R., Lee, D. Y., dan Kennedy, T. W. 2009. *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. NAPA research and education foundation.

Direktorat Jendral Bina Marga, 2018. Spesifikasi Umum Divisi 6. Penerbit Bina Marga. Jakarta

Djalante, S. 2011. Pengaruh Ketahanan Beton Aspal (*Ac-Bc*) Yang Menggunakan Asbuton Butir Tipe 5/20 Terhadap Air Laut Ditinjau Dari Karakteristik Mekanis Dan Durabilitasnya. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Transportasi*, *1*(1), 57-68.

Fauziah, M., dan Safitri, A. D. 2016. Perbandingan Karakteristik Campuran *Superpave* Dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 Dan *Retona Blend 55* Pada Berbagai Variasi Durasi Rendaman Air Hujan. *In Prosiding Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi*.

Ghuzlan, K. A., Bara'W, A. M., dan Al-Momani, A. S. 2020. *Rutting performance of asphalt mixtures with gradations designed using Bailey and conventional Superpave methods*. *Construction and building materials*, *261*, 119941.

Hadi, M.A., Asrorunniam, A.F., dan Apriliyanti, H.R., 2024. Investigasi Pengaruh Zona Larangan Pada Gradasi Superpave Terhadap Standar Marshall. *Jurnal Transportasi*, *24*(3), pp.199-208.

Hadi, M. A., dan Fauziah, M. 2019. Perbandingan Karakteritik Campuran *Superpave* Antara yang Menggunakan Bahan Ikat *Starbit E-55* dengan Pen 60/70 pada Variasi Durasi Rendaman Air Payau. In *Civil Engineering and Environment Symposium*.

Hadi, M.A., Subarkah dan Fauziah, M., 2021. Comparative Study of Marshall Properties and Durability of Superpave and AC-WC Pavement by Using Starbit E-55 and Pen 60/70. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 933, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.

Hadi, M. A., dan Fauziah, M. 2022. Studi komparasi prediksi umur pelayanan antara campuran *Superpave* dan *AC-WC* menggunakan permodelan viskoelastik dan elastik. *Teknisia*, *27*(2), 71-82.

Hariyadi, E.S. dan Dewi, C.K.T., 2024. Analisis Kinerja Laboratorium Campuran Stone Mastic Asphalt Dengan Asbuton Murni Yang Dipadatkan Menggunakan Superpave Gyratory Compactor. *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, *2*(6).

Hardiyatmo, H. C. 2019. Perancangan perkerasan jalan dan penyelidikan tanah. *Gadjah Mada University Press*.

Hesami, E., Birgisson, B., dan Kringos, N. 2015. *Effect of mixing sequence on the workability and performance of asphalt mixtures*. *Road Materials and Pavement Design*, *16*(sup2), 197-213.

Hidayat, M. I. 2021. Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal Crumb Rubber (Skripsi).

Iqbal, I., dan Fauziah, M. 2023. *Experimental study of the use of waste rubber tire additives using the sequential mixing method on the performance of Hot-Rolled Sheet-Wearing Course mixtures*. *TEKNIK*, *44*(2), 167-175.

Kandhal, P. S., dan Cooley Jr, L. A. 2001. *The restricted zone in the Superpave aggregate gradation specification* (No. Project 9-14 FY'98).

Karahançer, S., Erişkin, E., Çapalı, B., Saltan, M., dan Terzi, S. 2018. *Superpave volumetric mix design of hot mix asphalt*: case study of Isparta. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *6*(1), 108-117.

Kiselev, A., Zhang, H., dan Liu, Z. 2021. *The effect of two-phase mixing on the functional and mechanical properties of TPS/SBS-modified porous asphalt concrete*. *Construction and Building Materials*, *270*, 121841.

Kok, B. V., dan Kuloglu, N. 2011. *Effects of two-phase mixing method on mechanical properties of hot mix asphalt*. *Road Materials and Pavement Design*, *12*(4), 721-738.

Maqbool, S., Khan, A.H., Rizvi, M.A., Inam, A. dan Kashmiri, F.A., 2022. Modelling and evaluating moisture susceptibility of laboratory prepared asphalt concrete mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, *13*(1), p.101512.

Metasari, D. Y., Hasanuddin, A., dan Koesoemawati, D. J. 2018. Perbandingan Kinerja Laston Ac-Wc Berdasarkan Spesifikasi Gradasi Agregat Yang Diizinkan. Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Ketekniksipilan dan Lingkungan. Universitas Jember. Jawa Timur

Nazir, A., Liao, M.C., Zhu, Y.W. dan Nazir, U., 2022. *Design and evaluation of asphalt concrete incorporating plastic aggregates fabricated using 3D printing technology*. *3D Printing and Additive Manufacturing*, *9*(3), pp.212-222.

Pokorski, P., Radziszewski, P. dan Sarnowski, M., 2021. *Study of high-temperature properties of asphalt mixtures used for bridge pavement with concrete deck. Materials*, *14*(15), p.4238.

Rangan, P.R. dan Tumpu, M., 2022. Marshall test characteristics of AC-BC mixture to determination of optimum asphalt content and Marshall immersion index

using Portland composite cement as filler. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *17*(18), pp.1666-1673.

Raza, A., Khan, I., Tufail, R.F., Frankovska, J., Mushtaq, M.U., Salmi, A., Awad, Y.A. dan Javed, M.F., 2022. Evaluation of moisture damage potential in hot mix asphalt using polymeric aggregate treatment. *Materials*, *15*(15), p.5437.

Rizal, R. S., Susilowati, A., dan Susanto, H. 2019. Kajian Penggunaan *Wetfix Be* Pada Beton Aspal Campuran Panas Bergradasi *Superpave*. *Jurnal Ilmiah Teknologi Infomasi Terapan*, *5*(2), 66-74.

Strategic Highway Research Program (SHRP) A-407. 1994. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. Strategic Highway Research Program National Research Council. Washington.

Subarkah, 2015. Modul Praktikum Bahan Perkerasan Jalan. Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta

Sukirman, S. 2003. Beton Aspal Campuran Panas, Edisi Kedua. *Yayasan Obor Indonesia. Jakarta*.

Sukirman, S. 2010. Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur (Vol. 1). *Nova*.

Tutu, K. A., Ntramah, S., dan Tuffour, Y. A. 2022. *Superpave performance graded asphalt binder selection for asphalt mixture design in Ghana*. *Scientific African*, *17*, e01348.

Wahyudi, A. T. 2020. Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Campuran Superpave dan Aspal Porus (Skripsi).

Wahyudi, M. 2011. Studi Praktis Konsep Zona Terlarang Campuran Agregat Gradasi Menerus *Superpave*.

Yaro, N. S. A., Napiah, M. B., Sutanto, M. H., Usman, A., dan Saeed, S. M. 2021. *Performance evaluation of waste palm oil fiber reinforced stone matrix asphalt mixtures using traditional and sequential mixing processes*. *Case Studies in Construction Materials*, *15*, e00783.

Zhang, J., Cooley Jr, L. A., Hurley, G., dan Parker, F. 2004. *Effect of Superpave defined restricted zone on hot-mix asphalt performance*. *Transportation research record*, *1891*(1), 103-111.

Zumrawi, M. M., dan Edrees, S. A. S. 2019. Comparison of Marshall and Superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, *2*(1), 29-35.

LAMPIRAN