

**KARAKTERISTIK MODIFIKASI *HOT MIX ASPHALT*  
DENGAN KOMPOSISI KOMPOSIT *POLYMER***

*Hot Mix Asphalt Modification Characteristics  
With Polymer Composition*



**STELLA JUNUS**

**D043201002**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2024**

**KARAKTERISTIK MODIFIKASI *HOT MIX ASPHALT*  
DENGAN KOMPOSISI KOMPOSIT *POLYMER***

Disertasi  
sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program Studi Doktor Ilmu Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

STELLA JUNUS  
D043201002

kepada

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**DISERTASI**

KARAKTERISTIK MODIFIKASI *HOT MIX ASPHALT*  
DENGAN KOMPOSISI KOMPOSIT *POLYMER*

**STELLA JUNUS****D043201002**

telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Doktor pada tanggal  
21 Oktober 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Doktor Ilmu Teknik Mesin  
Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:

Promotor,



**Prof. Dr. Ir. Ilyas Renreng, MT**

NIP. 19570914 198703 1 001

Ko-promotor 1,



**Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST., MT**

NIP. 19770707 200501 1 001

Ko-promotor 2,



**Azwar Hayat, ST., M.Sc., Ph.D**

NIP. 19840126 201212 1 002

Dekan Fakultas Teknik,



**Dr.Eng. Andi Amijoyo Mochtar,**

**ST.,M.Sc**

NIP. 19760216 201012 1 002

Ketua Program Studi,



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli,**

**ST.,MT.,IPM.,ASEAN. Eng**

NIP. 19730926 200012 1 002

## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Karakteristik Modifikasi *Hot Mix Asphalt* Dengan Komposisi Komposit *Polymer*” adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing Prof. Dr. Ir. Ilyas Renreng,.MT sebagai Promotor dan Dr.Muhammad Syahid,.ST,.MT sebagai co-promotor-1 serta Azwar Hayat,.ST,.MT,.Ph.D sebagai co-promotor-2. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Jurnal (*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Volume 2, Halaman 20-30, dan DOI 10.15587/1729-4061.2024.299189) sebagai artikel dengan judul “*Identification the effect of polymer Composition in Hot Mix Asphalt Modification*”. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 24 September 2024



Stella Junus  
NIM D43201002

## Ucapan Terima Kasih

Puji syukur kahadirat Allah Subhanahuwataala atas izin dan kuasanya naskah disertasi ujian tertutup (ujian akhir) kedua hasil penelitian ini telah dirampungkan. Penelitian yang dilakukan adalah penelitian eksperimen kuantitatif, dimana proses pengambilan data dilakukan secara langsung dilaboratorium dengan menggunakan referensi-referensi sebelumnya sebagai pembanding dalam menganalisis. Penelitian ini tentunya diarahkan dan dikoreksi oleh tim Promotor, dengan berbagai masukan terkait proses, analisis maupun hasil akhir yang dituju. Penulis pun menyadari dalam penyajian hasil penelitian tahap kedua (2) ini masih banyak kekurangan yang tentunya membutuhkan masukan dan koreksi dari tim penguji nantinya.

Ucapan terima kasih penulis haturkan kepada tim Promotor , Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, Kepala dan Sekretaris Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik beserta jajarannya, beserta seluruh staf tenaga penunjang akademik Departemen Teknik Mesin maupun Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Teman-Teman mahasiswa seperjuangan program doktor teknik mesin semua angkatan, terlebih buat keluarga sebagai suporting sistem terpenting. Tak lupa pula kepada Pemda Kab. Gorontalo selaku Mitra (*Stakeholder*) yang telah menjadi wilayah dan Objek serta tempat penelitian selama menempuh jenjang pendidikan strata tiga (S3), dan kampus Universitas Negeri Gorontalo (UNG) tempat kami mengabdikan diri sebagai tenaga pengajar di Fakultas Teknik.

1. Prof.Dr.Ir. Ilyas Renreng,.MT selaku Ketua Promotor, Dr. Muhammad Syahid,ST,.MT selaku co-promotor 1, Azwar Hayat, ST,.MT,.Ph.D selaku co-promotor 2.
2. Prof. Dr.Ir.Onny S. Sutresman,.MT sebagai komisi Tim Penguji.
3. Rektor Universitas Hasanuddin
4. Dr.Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST,.MT,. selaku Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

5. Dr. Muhammad Syahid,ST,.MT Selaku Kapala Departement Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

6. Fauzan,ST,.MT,Ph.D selaku Sekretaris Departemen Teknik Mesin Fakultas  
Teknik Universitas Hasanuddin

Semoga Allah SWT meridhoi dan selalu memberikan Rahmat-NYA untuk kita  
sekalian.

Penulis,

Stella Junus

## ABSTRAK

STELLA JUNUS. **Karakteristik Modifikasi *Hot Mix Asphalt* dengan Komposisi Komposit *Polymer*** (dibimbing oleh Ilyas Renreng, Muhammad Syahid, dan Azwar Hayat).

*Hot Mix Asphalt* adalah salah satu kombinasi komposisi material alam dengan aspal itu sendiri dalam kebutuhan infrastruktur jalan raya yang semakin banyak dibutuhkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai hasil pengujian Marshall optimum yang dihasilkan pada masing-masing campuran polymer jenis HDPE dan karet sintetis (*crumb rubber/cr*) dengan masing-masing komposisi campuran 4%, 5%, dan 6% pada temperatur 170°C, 200°C, dan 230°C. Berdasarkan komposisi campuran dan temperatur Marshall optimum didapatkan untuk campuran polymer jenis HDPE didapatkan pada nilai 5% dengan temperatur 200 oC dengan density (kepadatan) 2.26 gr/cc, VIM (rongga dalam campuran) 3.60%, VMA (rongga dalam agregat) 15.59%, VFB (rongga terisi aspal) 78.88%, stabilitas 2409.60 kg, dan *flow* (pelelehan) 2.99 mm sedangkan untuk campuran karet sintetis (*crumb rubber*) didapatkan nilai hasil pengujian Marshall optimum pada campuran 4% dan temperatur 200oC dengan metode cacah pada ukuran saringan lolos nomor 4 tertahan nomor 16 atau sama dengan 2,375 mm nilai density (kepadatan) 2.26 gr/cc, VIM (rongga dalam campuran) 3.05%, VMA (rongga dalam agregat) 15.70%, VFB (rongga terisi aspal) 80.60%, stabilitas 2288.60 kg dan *flow* (pelelehan) 3.54 mm. Berdasarkan data hasil perhitungan dari penggabungan kedua jenis filler yang ditambahkan pada campuran HMA maka didapatkan suhu optimum berdasarkan hasil analisis marshall pada temperatur 175°C dengan nilai perolehan untuk nilai density (kepadatan) 2.25 gr/cc, VIM (rongga dalam campuran) 3.04%, VMA (rongga dalam agregat) 15.77%, VFB (rongga terisi aspal) 80.74%, stabilitas 2316.50 kg dan *flow* (pelelehan) 3.92 mm. Analisis keretakan permukaan (*crack*) berdasarkan pembebanan melalui pengujian tekan bebas (*compressive test*) dengan beban alat maksimum 800 KN/cm<sup>2</sup> dengan rata-rata beban 60 KN/detik, untuk performa campuran HMA dengan polymer jenis HDPE dengan komposisi campuran 4% pada temperatur 200°C diperoleh beban maksimum 51,49 KN dengan rata-rata retak diperoleh 0,01 KN/mm<sup>2</sup>, untuk performa campuran HMA dengan karet sintetis dengan komposisi campuran 5% pada temperature 200°C diperoleh beban maksimum 68,169 KN dengan rata-rata retak diperoleh 0,01 KN/mm<sup>2</sup>, dan untuk penggabungan pada keduanya dengan temperatur 175°C diperoleh beban maksimum 69,974 KN dengan rata-rata retak diperoleh 0,01 KN/mm<sup>2</sup> dengan modulus elastisitas 0,341 KN/mm<sup>2</sup>.

Kata kunci: Marshall, Density, VMA, VIM, VFB, Flow, Stability, Crack, Compressive test

## **ABSTRACT**

**STELLA JUNUS. Characteristics of Modified Hot Mix Asphalt with Polymer Composite Composition** (supervised by Ilyas Renreng, Muhammad Syahid, and Azwar Hayat).

Hot Mix Asphalt is a combination of natural material composition with asphalt itself in the needs of highway infrastructure that is increasingly needed. This study aims to identify the optimum Marshall test result value produced in each HDPE and synthetic rubber (crumb rubber/cr) polymer mixture with each mixture composition of 4%, 5%, and 6% at temperatures of 170oC, 200oC, and 230oC. Based on the composition of the mixture and the optimum Marshall temperature obtained for HDPE polymer mixtures obtained at a value of 5% with a temperature of 200 oC with a density of 2.26 gr/cc, VIM (voids in the mixture) 3.60%, VMA (voids in the aggregate) 15.59%, VFB (voids filled with asphalt) 78.88%, stability 2409.60 kg, and flow (melting) 2. 99 mm while for the mixture of synthetic rubber (crumb rubber) obtained the value of the optimum Marshall test results at a mixture of 4% and a temperature of 200oC with the chopping method on the size of the filter passes number 4 retained number 16 or equal to 2.375 mm density value (density) 2.26 gr / cc, VIM (voids in the mixture) 3.05%, VMA (voids in the aggregate) 15.70%, VFB (voids filled with asphalt) 80.60%, stability 2288.60 kg and flow (melting) 3.54 mm. Based on the calculated data from the combination of the two types of fillers added to the HMA mixture, the optimum temperature is obtained based on the results of the marshall analysis at a temperature of 175°C with the acquisition value for the density value of 2.25 gr/cc, VIM (voids in the mixture) 3.04%, VMA (voids in the aggregate) 15.77%, VFB (voids filled with asphalt) 80.74%, stability 2316.50 kg and flow (melting) 3.92 mm. Analysis of surface cracking (crack) based on loading through free compressive testing (compressive test) with a maximum tool load of 800 KN / cm<sup>2</sup> with an average load of 60 KN / sec, for the performance of the HMA mixture with HDPE type polymer with a mixture composition of 4% at a temperature of 200°C obtained a maximum load of 51.49 KN with an average crack obtained 0.01 KN / mm<sup>2</sup>, for the performance of HMA mixture with synthetic rubber with a mixture composition of 5% at a temperature of 200°C obtained a maximum load of 68.169 KN with an average crack obtained 0.01 KN/mm<sup>2</sup>, and for the combination of the two with a temperature of 175°C obtained a maximum load of 69.974 KN with an average crack obtained 0.01 KN/mm<sup>2</sup> with an elastic modulus of 0.341 KN/mm<sup>2</sup>.

Keywords: Marshall, Density, VMA, VIM, VFB, Flow, Stability, Cracking, Compression test

## DAFTAR ISI

|  | <b>Halaman</b> |
|--|----------------|
| HALAMAN JUDUL .....                          | i              |
| HALAMAN PENGAJUAN.....                       | ii             |
| LEMBAR PENGESAHAN .....                      | iii            |
| LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI.....    | iv             |
| UCAPAN TERIMA KASIH.....                     | v              |
| ABSTRAK .....                                | vii            |
| <i>ABSTRACT</i> .....                        | viii           |
| DAFTAR ISI .....                             | ix             |
| DAFTAR TABEL .....                           | xi             |
| DAFTAR GAMBAR .....                          | xii            |
| DAFTAR LAMPIRAN .....                        | xv             |
| DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH, DAN LAMBANG ..... | xvii           |
| <b>BAB I PENDAHULUAN UMUM.....</b>           | <b>1</b>       |
| 1.1 Latar Belakang .....                     | 1              |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                    | 5              |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                  | 6              |
| 1.4 Kegunaan Penelitian .....                | 6              |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....            | 7              |
| 1.6 Kebaruan Penelitian .....                | 7              |
| <b>BAB II TOPIK PENELITIAN I .....</b>       | <b>8</b>       |
| 2.1 Abstrak .....                            | 8              |
| 2.2 Pendahuluan .....                        | 10             |
| 2.3 Metode .....                             | 13             |
| 2.4 Hasil dan Pembahasan .....               | 27             |
| 2.5 Kesimpulan .....                         | 41             |
| 2.6 Daftar Pustaka .....                     | 42             |
| <b>BAB III TOPIK PENELITIAN II .....</b>     | <b>44</b>      |
| 3.1 Abstrak .....                            | 44             |
| 3.2 Pendahuluan .....                        | 46             |
| 3.3 Metode .....                             | 49             |

|   |    |
|---|----|
| 3.4 Hasil dan Pembahasan .....                | 56 |
| 3.5 Kesimpulan .....                          | 72 |
| 3.6 Daftar Pustaka .....                      | 74 |
| BAB IV PEMBAHASAN UMUM .....                  | 76 |
| 4.1 Pembahasan Hasil Penelitian Tahap 1 ..... | 76 |
| 4.2 Pembahasan Hasil Penelitian Tahap 2 ..... | 77 |
| BAB V KESIMPULAN UMUM .....                   | 81 |
| 5.1 Kesimpulan.....                           | 81 |
| 5.2 Saran.....                                | 82 |
| DAFTAR PUSTAKA .....                          | 84 |
| LAMPIRAN .....                                | 89 |

**DAFTAR TABEL**

| Nomor Urut   | Halaman |
|--|---------|
| 1. Hasil Uji Parameter <i>Marshall</i> pada KOA 5.40% .....  | 28      |
| 2. Hasil Uji Parameter <i>Marshall</i> Campuran HMA dengan HDPE<br>Optimum Kadar 5% pada Suhu 200°C .....        | 28      |
| 3. Hasil Uji Parameter <i>Marshall</i> Campuran HMA Kadar Karet Sintetis<br>(CR) Optimum 4% pada Suhu 200°C..... | 29      |
| 4. Hasil Uji Parameter <i>Marshall</i> pada Suhu Standart 175°C<br>Campuran HMA Gabungan.....                    | 40      |
| 5. Tabel Gugus Fungsi Serapan Senyawa untuk HMA Tanpa<br>Campuran .....  | 57      |
| 6. Wavenumber Bilangan Gelombang KOA.....  | 59      |
| 7. Tabel Interaksi Gelombang Infrared .....  | 60      |
| 8. Wavenumber Modifikasi Aspal dengan Campuran Karet (CR) dan<br>Plastik HDPE.....                               | 66      |
| 9. Korelasi Antara Jenis Vibrasi gugus Fungsional dan Frekuensi  | 66      |

## DAFTAR GAMBAR

| Nomor Urut |  | Halaman |
|------------|--|---------|
| 1.         | Data Komposisi Sampah Indonesia SIPN 2023 .....                              | 2       |
| 2.         | Bagan Alir Proses Penelitian Tahap 1 .....                                   | 16      |
| 3.         | Limbah Karet ( <i>Crumb Rubber</i> ) Jenis Ban Bekas .....                   | 18      |
| 4.         | Limbah <i>Polymer</i> (Plastik) Jenis <i>High Density Polyethylene</i> ..... | 18      |
| 5.         | Agregat Halus dan Kasar .....  | 18      |
| 6.         | Aspal Curah Pen.60/70 .....  | 19      |
| 7.         | <i>Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate</i> .....             | 19      |
| 8.         | <i>Los Angeles Abrasion Test</i> .....                                       | 19      |
| 9.         | <i>Sieve</i> .....   | 20      |
| 10.        | <i>Propotional Caliver Device</i> .....                                      | 20      |
| 11.        | <i>Softening Point Test Set</i> .....  | 20      |
| 12.        | <i>Hand-operated Laboratory Penetration Test Set</i> .....                   | 21      |
| 13.        | <i>Specific Gravity of Semi-solid Bituminous Materials</i> .....             | 21      |
| 14.        | <i>Compaction Set</i> .....  | 21      |
| 15.        | <i>Marshall Test Set</i> .....   | 22      |
| 16.        | Alat Uji Tekan (Compressive Test).....                                       | 22      |
| 17.        | Proses Pembuatan Brikel Aspal.....   | 26      |
| 18.        | Brikel Aspal sebagai Spesimen Benda Uji .....                                | 27      |
| 19.        | Hasil Uji Marsal Kadar Aspal Optimum .....                                   | 27      |
| 20.        | Hasil Uji <i>Marshall</i> Kadar HDPE 5% Suhu 200°C.....                      | 28      |
| 21.        | Hasil Uji <i>Marshall</i> Kadar CR 4% Suhu 200°C .....                       | 29      |

|  |    |
|--|----|
| 22. Garfik <i>Density</i> HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C....                 | 30 |
| 23. Garfik VIM HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C .....                          | 31 |
| 24. Garfik VMA HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C.....                           | 32 |
| 25. Garfik VFB HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C.....                           | 33 |
| 26. Stabilitas HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C.....                           | 34 |
| 27. Garfik Flow HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C .....                         | 35 |
| 28. Garfik <i>Compressive Test</i> HMA Kadar HDPE 5%, CR 4%<br>Suhu 200°C.....     | 36 |
| 29. Garfik Hubungan Suhu Terhadap Kuat Tekan KO (HMA<br>Murni).....                | 37 |
| 30. Garfik Hubungan Suhu Terhadap Campuran CR 4% dan<br>HMA .....                  | 37 |
| 31. Garfik Hubungan Suhu Terhadap Campuran HDPE 5% dan<br>HMA .....                | 38 |
| 32. Garfik Hubungan Suhu Terhadap Campuran HDPE 5% dan<br>HMA .....                | 38 |
| 33. Garfik Hubungan Suhu Terhadap Kuat Tekan .....                                 | 39 |
| 34. Garfik Marsal Temperatur Standar SNI Campuran HDPE 5%<br>+ CR 4% dan HMA ..... | 40 |
| 35. Bagan Alir Proses Penelitian Tahap 2.....                                      | 52 |
| 36. Struktur Morfologi HMA Murni .....   | 56 |
| 37. <i>Spectra-IR</i> KOA (HMA Murni) .....  | 58 |
| 38. <i>Spectra-IR</i> KOA (HMA Murni) .....  | 58 |
| 39. Struktur Morfologi Campuran HMA dan HDPE .....                                 | 62 |
| 40. Struktur Morfologi Campuran HMA dan CR .....                                   | 63 |
| 41. <i>Spectra-IR</i> Modifikasi HMA Gabungan HDPE dan CR .....                    | 65 |

42. *Spectra-IR* Modifikasi HMA Gabungan HDPE dan CR ..... 65

## DAFTAR LAMPIRAN

| Nomor Urut   | Halaman |
|--|---------|
| 1. Peninjauan Lokasi Material Alam (Penentuan Quari).....  | 89      |
| 2. Proses Pemilihan dan Verifikasi Material Alam (Agregat) Berdasarkan Kebutuhan/Proses Penyaringan .....                                  | 89      |
| 3. Proses <i>Marshall</i> 1 .....  | 90      |
| 4. <i>Marshall</i> (Persiapan) Identifikasi Agregat.....   | 90      |
| 5. Proses <i>Mixing</i> /Pencampuran .....   | 90      |
| 6. Proses Pembentukan Briket Melalui Media Cetak .....   | 91      |
| 7. Proses Pencetakan (Tanda Panah Warna Biru) .....  | 91      |
| 8. Proses Pemadatan Menggunakan <i>Hammer</i> (Mesin Penumbuk) .....   | 91      |
| 9. Proses Pemisahan Benda Uji dan Alat Cetak .....   | 92      |
| 10. Material/Benda Uji Siap untuk Dilakukan Pengujian <i>Marshall</i> ..   | 92      |
| 11. Benda Uji Setelah Dilakukan Uji <i>Marshall</i> .....  | 92      |
| 12. Spesimen Benda Uji Sebelum Dilakukan Pengujian Tekan .....   | 93      |
| 13. Alat Uji Tekan ( <i>Compressive Test</i> ) di Laboratorium Teknik Sipil Ung Spesimen Benda Uji / Material Uji (Tanda Panah Biru) ..... | 93      |
| 14. Spesimen Benda Uji Setelah dilakukan Pengujian Tekan .....   | 93      |
| 15. Alat Uji Tekan ( <i>Compressive Test</i> ) di Laboratorium Teknik Mesin UNHAS.....   | 94      |
| 16. Foto Hasil Uji Sem Kadar Aspal Optimum (Hma Murni Tanpa Campuran) Perbesaran 500 X dengan Ukuran 50 $\mu$ m .....                      | 95      |
| 17. Foto Hasil Uji Sem Kadar Aspal Optimum (Hma Murni Tanpa Campuran) Perbesaran 3000 X dengan Ukuran 10 $\mu$ m .....                     | 95      |

|   |     |
|---|-----|
| 18. Hasil Uji <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDS) Kadar Aspal Optimum (HMA Murni tanpa Campuran) Tabel Sampel KOA.....                                 | 96  |
| 19. Grafik Energi (EC) Tegangan Emisi Minimum (keV).....  | 96  |
| 20. Grafik Persen Atom (%) .....  | 97  |
| 21. Grafik Persen Massa (%) .....   | 97  |
| 22. Grafik Persen Mol (%).....  | 98  |
| 23. Foto Hasil Uji SEM Polymer HDPE Persentase Campuran 5% Temperatur 200°C Perbesaran 500 x dengan ukuran 50µm....                                     | 98  |
| 24. Foto Hasil Uji SEM Polymer HDPE Persentase Campuran 5% Temperatur 200°C Perbesaran 1000 x dengan ukuran 20µm..                                      | 99  |
| 25. Hasil Uji <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDS) Polymer HDPE Persentase Campuran 5% Temperatur 200°C. Tabel Sampel 5% Plastik Temperatur 200°C ..... | 99  |
| 26. Grafik Energi (EC) Tegangan Emisi Minimum (keV) .....   | 100 |
| 27. Grafik Persen Atom (%) .....  | 100 |
| 28. Grafik Persen Massa (%) .....   | 101 |
| 29. Foto Hasil Uji SEM Limbah Karet/ Crumb Rubber (CR) Persentase Campuran 4% Temperatur 200°C. Perbesaran 500 x dengan ukuran 50µm .....               | 102 |
| 30. Hasil Uji <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDS) Limbah Karet Persentase Campuran 4% Temperatur 200°C.....  | 102 |
| 31. Tabel Sampel 4% Karet Temperatur 200°C (CR).....  | 103 |
| 32. Grafik Energi (EC) Tegangan Emisi Minimum (keV) .....   | 103 |
| 33. Grafik Persen Atom (%) .....  | 104 |
| 34. Grafik Persen Massa (%) .....   | 104 |
| 35. Grafik Persen Mol (%).....  | 106 |

## Daftar Istilah

| Istilah           | Arti dan Penjelasan                                    |
|-------------------|--|
| Pb                | Kadar Aspal Rencana                                    |
| CA                | Agregat Kasar Tertahan Saringan No.4                   |
| FA                | Agregat Halus Lolos Saringan No. 4 Tertahan No. 200    |
| FF                | Filler Lolos Saringan No. 200                          |
| K                 | Konstanta  |
| Gsb               | Berat Jenis Kering Agregat (gr/cc)                     |
| P                 | Persentase Berat Agregat (%),                          |
| Gsa               | Berat Jenis Agregat (gr/cc)                            |
| Gse               | Berat Jenis Efektif/Efektive Spesific Gravity (gr/cc), |
| Pmm               | Persen Berat Total Campuran (=100)                     |
| Gmm               | Berat Jenis Campuran Maksimum Teoritis (gr/cc)         |
| Gb                | Berat Jenis Aspal                                      |
| Gmb               | Berat Jenis Campuran Setelah Pemadatan (gr/cc)         |
| W $\alpha$        | Volume Campuran Setelah Pemadatan (cc)                 |
| V <sub>bulk</sub> | Berat di Udara (gr)                                    |
| P <sub>ba</sub>   | Penyerapan Aspal, Persen Total Agregat (%)             |
| P <sub>be</sub>   | Kadar Aspal Efektif, Persen Total Campuran (%)         |

$P_s$                       Kadar Agregat, Persen Terhadap  
Berat Total Campuran (%)

---

## Daftar Singkatan dan Lambang

| Lambang/singkatan | Arti dan Penjelasan  |
|-------------------|--|
| A                 | Luas Penampang (m <sup>2</sup> )                               |
| ATR               | Attenuated Total Reflectance                                   |
| CR                | Crumb Rubber   |
| D                 | Diameter (m)   |
| EDS               | Energy Dispersive X-Ray  |
| f                 | Faktor Gesek   |
| FTIR              | Fourier Transform Infra Red                                    |
| HDPE              | High Density Polyethylene                                      |
| HMA               | Hot Mix Asphalt  |
| L                 | Panjang (m)  |
| m                 | Massa (kg)   |
| KOA               | Kadar Optimum Aspal  |
| P                 | Tekanan (Paskal)   |
| SEM               | Scanning Electron Microscopy                                   |
| UCS               | Uniaxial Compression Set                                       |
| v                 | Kecepatan (m/s)  |
| VIM               | Rongga Campuran Setelah Pematatan, Persentase Volume Total (%) |

|        |  |
|--------|--|
| VMA    | Rongga Rongga di Antara Agregat,<br>Persentase dari Volume Total (%) |
| VFB    | Rongga Yang Terisi Aspal,<br>Presentase dari VMA (%)                 |
| $\mu$  | Viskositas Dinamik (N.s/m <sup>2</sup> )                             |
| $\nu$  | Viskositas Kinematik (m <sup>2</sup> /s)                             |
| $\tau$ | Tegangan Geser   |
| $\rho$ | Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )                                     |

---

# BAB I PENDAHULUAN

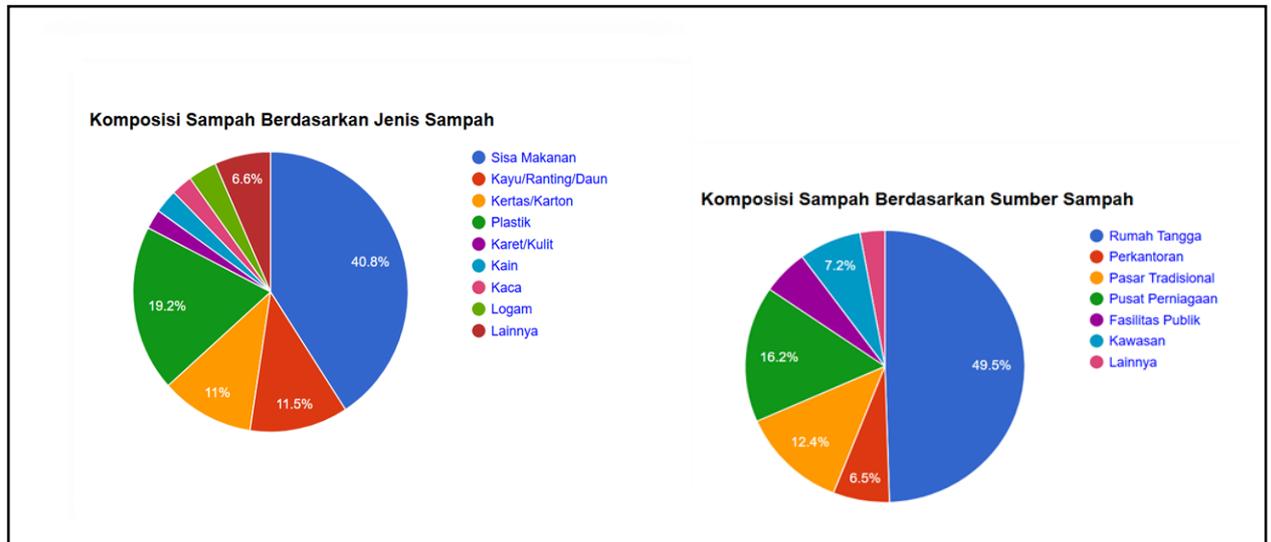
## 1.1 Latar Belakang

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Nasional (BPS) diperoleh sekitar dua ratus delapan belas juta delapan ratus enam puluh delapan (218.868 ) kilo meter (KM) jalan masih dengan jenis bukan aspal, hal ini tentunya tidak hanya memerlukan waktu pengerjaan yang lama, akan tetapi juga ketersediaan material dimasing-masing wilayah yang ada. Peningkatan kapasitas fungsi utama jalan raya tentunya ditunjang oleh infrastruktur jalan yang memadai sesuai dengan pembebanan kendaraan yang akan melaluinya.

Informasi terkait sampah pada tahun 2020 berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional Kementerian Lingkungan Hidup RI sampah jenis sampah plastik berada pada posisi urutan ke empat (4) dengan angka 17.163 juta ton atau sekitar 17% dan sampah karet berada pada posisi urutan ke lima (5) 1.861 juta ton atau sekitar 1,8 %, hal ini relatif rendah dibanding angka 40 % sampah diIndonesia bersumber dari sisa makanan. Data terbaru yang disajikan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan R.I pada tahun 2023 untuk persentase pengelolaan sampah di dua ratus delapan puluh delapan (288) kabupaten Kota se Indonesia adalah sebagai berikut :

- Timbunan Sampah 288 Kabupaten/kota se-Indonesia 31,443,053.53 (ton/tahun).
- Pengurangan Sampah 288 Kabupaten/kota se-Indonesia 14.71% atau 4,624,451.28 ton/tahun.
- Penanganan Sampah 288 Kabupaten/kota se-Indonesia 50,09% atau 15,749,523.78 ton/tahun.
- Sampah terkelola 64.8% atau 20,373,975.06 ton/tahun.
- Sampah Tidak terkelola 35,2% atau 11,069,078.47 ton/tahun.

Data sampah Indonesia terdiri dari komposisi sebagai berikut :



**Gambar 1.** Data Komposisi Sampah Indonesia SIPSN 2023

Berdasarkan identifikasi dari material sampah yang dihasilkan, kedua material ini bisa didaur ulang kembali atau dapat diolah dan dapat dicampurkan menjadi produk olahan turunan.

Produk turunan dari hasil olahan sampah diantaranya adalah modifikasi produk padat, cair dan bahkan bisa menjadi energi. *Hot Mix Asphalt* (HMA) adalah salah satu produk yang tersusun oleh material alam dan material buatan yang tercampur secara bersamaan menjadi struktur produk yang baru. Secara struktur aslinya Aspal atau bitumen adalah suatu cairan kental yang merupakan senyawa hidrokarbon dengan sedikit mengandung sulfur, oksigen, dan klor. Aspal sebagai bahan pengikat dalam perkerasan lentur mempunyai sifat viskoelastis. Aspal tampak padat pada suhu ruang padahal adalah cairan yang sangat kental. Aspal merupakan bahan yang sangat kompleks, dan secara kimia belum dikarakterisasi dengan baik. Kandungan utama aspal adalah senyawa karbon jenuh, dan tak jenuh, alifatik, dan aromatik yang mempunyai atom karbon sampai seratus lima puluh (150) per molekul. Atom-atom selain hidrogen, dan karbon yang juga menyusun aspal adalah nitrogen, oksigen, belerang, dan beberapa atom lain. Secara kuantitatif, biasanya delapan puluh persen (80%) massa aspal adalah karbon, sepuluh persen (10%) hydrogen, enam persen (6%) belerang, dan sisanya oksigen, dan nitrogen, serta sejumlah renik besi, nikel, dan

vanadium. Senyawa-senyawa ini sering dikelaskan atas aspalten (yang massa molekulnya kecil), dan malten (yang massa molekulnya besar). Biasanya aspal mengandung lima persen (5%) sampai dua puluh lima persen (25%) aspalten. Sebagian besar senyawa di aspal adalah senyawa polar.

Menurut Nugraha Yuda Pratama,dkk,2018, Aspal merupakan salah satu material yang digunakan sebagai bahan perkerasan jalan raya, material ini dipilih karena hasil akhirnya yang baik dan nyaman sebagai perkerasan lentur. Salah satu cara untuk mencegah terjadinya kerusakan pada perkerasan jalan akibat beban muatan kendaraan adalah dengan meningkatkan kualitas dan stabilitas perkerasan tersebut. Oleh sebab itu penggunaan bahan tambah (*Additive*) menjadi salah satu alternative yang digunakan untuk mendapatkan kualitas lapis perkerasan yang baik. Aspal berasal dari alam atau dari pengolahan minyak bumi. Menurut Sofyan Saleh,dkk.2016, peningkatan volume lalu lintas yang melewati suatu ruas jalan dan rendahnya mutu konstruksi jalan menyebabkan kerusakan semakin meningkat, untuk mendukung kemampuan jalan, selain pondasi yang kuat juga diperlukan beton aspal yang baik, material yang baik dan perawatan yang baik pula. Banyak usaha telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas campuran, salah satunya dengan menggunakan aspal modifikasi polimer, yaitu aspal yang dibuat dengan mencampur aspal keras dengan polimer. Campuran aspal dengan menggunakan aspal modifikasi polimer dapat meningkatkan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi, mengatasi keretakan dan meningkatkan ketahanan yang tinggi dari kerusakan akibat penuaan sehingga dihasilkan pembangunan jalan yang lebih tahan lama serta dapat mengurangi biaya perawatan atau perbaikan jalan.

Berkembangnya teknologi dibidang material modifikasi mampu menghasilkan produk diantaranya adalah aspal campuran modifikasi. Aspal modifikasi yang dimaksudkan adalah komposisi aspal yang ada digabungkan dengan beberapa material diantaranya adalah styrofoam, abu kayu, batang bambu, daun alpukat, karet alam dan karet sintetik, limbah palstik dan masih ada beberapa material modifikasi lainnya. Berdasarkan beberapa sumber informasi dan referensi yang didapatkan, maka penelitian ini akan diorientasikan pada

penggabungan atau modifikasi dua material sekaligus yaitu material limbah *polymer* (plastik) dan limbah *rubber* (karet).

Karakteristik material modifikasi dalam hal ini adalah limbah *polymer* (plastik) sebagai material pertama (1) secara umum diidentifikasi dengan karakteristik termal dan karakteristik fisik. Karakteristik termal yaitu keadaan termal dari plastik menggunakan *Thermo Gravimetry Analyzer* dan *Differential Scanning Calorimeter* untuk menentukan rentang temperatur dekomposisi, suhu *softening*, dan pembakaran, serta produk yang dihasilkan ketika melewati rentang temperatur tersebut, sedangkan karakteristik fisik yaitu Karakteristik fisik, yaitu mencakup ketebalan, kelarutan dan rentang suhu *softening*. Jenis plastik yang bisa digunakan adalah jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) dan *Polypropylene* (PP).

Menurut Tjitjik Wasiah Suroso, 2017, Material modifikasi kedua adalah jenis *rubber* (karet). Beberapa rujukan menunjukkan jenis karet yang bisa digunakan adalah karet alam dan karet sintetis atau karet buatan. penggunaan karet alam adalah pada getahnya dengan sudah dilakukan proses pengawetan terlebih dahulu, dimana kandungan air yang dimiliki cukup tinggi dengan kandungan hidrokarbon yang mempunyai rantai panjang dengan ikatan rangkap yang disebut neoprane. Kelebihan dari penggunaan material substitusi karet alam ini adalah mampu menyerap minyak (malten) yang ada dalam aspal itu sendiri sehingga menjadi kenyal, akan tetapi struktur karet alam pun memiliki kekurangan diantaranya adalah temperatur, dimana jika temperatur pada proses pencampuran terlalu panas akan menyebabkan degradasi mutu karet alam sebagai fungsi utama. Rujukan berikutnya adalah karet dengan jenis sintetis atau karet buatan. Menurut Sri Mulyani, Dani Hamdani (2017), *Crumb Rubber* atau karet cacah yang digunakan sebagai bahan tambah terhadap bahan pengikat aspal yang terbaik adalah yang memiliki komposisi terdiri atas karet alam dan karet sintetis, dengan kadar karbon tinggi enam puluh koma empat belas persen (60,14 %), kadar polimer sebesar dua puluh lima koma empat puluh dua persen (25,42 %), *plasticizer content* sebesar empat koma sembilan persen (4,95 %), kadar debu kecil sebesar tujuh koma lima puluh tujuh persen (7,57 %), dan kadar sulfur sebesar satu koma enam puluh empat persen (1,64 %), sedangkan

sisanya adalah bahan lain yang tidak teruji. Sifat karakteristik bahan pengikat dengan menggunakan lima belas persen (15%) CR dengan kecepatan pencampuran enam ribu (6000) rpm yang terbaik pada temperatur pencampuran seratus empat puluh derajat celcius (140°C) dengan waktu pengadukan selama enam puluh (60) menit.

Berdasarkan beberapa referensi, maka penelitian ini difokuskan kepada pengembangan material tambah sebagai peningkatan performa HMA itu sendiri sesuai dengan kondisi dan struktur jalan raya di Indonesia, dengan beorientasi pada pengurangan deformasi permukaan jalan. Fokus penelitian pada kualifikasi campuran HMA dengan polimer jenis HDPE dan HMA dengan *crumb rubber*. HDPE adalah salah satu jenis polimer dengan kualitas terbaik dikelompoknya dan penelitian akan topik ini masih sangat jarang untuk di Indonesia. Demikian pula halnya dengan HMA dengan *crumb rubber*, selain merupakan limbah yang mudah didaur ulang, jenis ini pun memiliki kualitas terbaik. Menggabungkan masing-masing identifikasi kualitas terbaik dari masing-masing material tambah ini, diharapkan akan meningkatkan performa terbaik HMA pada saat pengaplikasiannya. Selain mendapatkan forma campuran modifikasi yang baru diharapkan produk ini akan mampu meningkatkan kinerja dan durabilitas jalan raya ketika diaplikasikan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka untuk pengembangan selanjutnya akan dilakukan dengan menggabungkan beberapa material penyusun *hot mix asphalt* atau agregat utuh, *polymer* (plastik) dalam hal ini sampah hasil buangan, *rubber* (karet) serta zat aditif lainnya dalam proses campuran material penyusun aspal, yang diorientasikan pada :

1. Bagaimana pengaruh campuran material tambah komposit polymer masing-masing jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) dan karet sintesis (*crumb rubber*) dengan *Hot Mix Asphalt* (HMA) berdasarkan variasi persentase berat dan temperatur serta pengaruh kedua jenis komposit (HDPE dan CR) terhadap HMA.
2. Bagaimana mengukur sifat mekanis dalam hal ini adalah retak permukaan

(*crack*) yang dihasilkan oleh penggabungan dua (2) material modifikasi HDPE dan CR dengan *Hot Mix Asphalt* (HMA) berdasarkan hasil performa terbaik campuran dan temperatur yang telah didapatkan dengan pembebanan maksimum.

3. Bagaimana mengidentifikasi struktur morfologi (mikro) unsur dan senyawa kimia yang terdapat dalam campuran berdasarkan bentuk gambar foto elektron.
4. Bagaimana mengidentifikasi gugus fungsi molekul yang terdapat dalam campuran secara keseluruhan dengan melakukan analisis pada panjang gelombang yang dihasilkan dan unsur kimia yang paling mendominasi.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh penambahan limbah polimer jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) pada *Hot Mix Asphalt* (HMA) terhadap uji Marshall, kuat tekan, struktur mikro dan uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).
2. Menganalisis pengaruh penambahan limbah jenis karet sintetik (*Crumb Rubber/CR*) terhadap uji Marshall, kuat tekan, struktur mikro dan uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).
3. Menganalisis pengaruh penambahan limbah *High Density Polyethylene* (HDPE) karet dan sintetik (*Crumb Rubber/CR*) terhadap uji Marshall, kuat tekan, struktur mikro dan uji *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).
4. Menemukan komposisi campuran modifikasi Hot Mix Aspal yang memenuhi standar SNI Kementerian PU-PR RI.

### 1.4 Kegunaan Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berkelanjutan diantaranya sebagai berikut :

1. Memanfaatkan ketersediaan limbah sampah plastik terutama jenis HDPE yang merupakan limbah dengan no. urut ke dua (2) terbanyak di Indonesia

dan limbah karet yang dihasilkan baik oleh aktivitas rumah tangga, maupun industri yang bisa didaur ulang.

2. Menemukan dan menganalisis komposisi ideal serta memperhitungkan beban maksimum pada jenis campuran *Hot Mix Asphalt* dengan modifikasi penambahan limbah *polymer* (plastik) jenis HDPE dan jenis material karet sintetis (*crumb rubber/cr*) berdasarkan hasil uji Marshall, uji tekan (*compressive test*).
3. Menemukan serta menginformasikan unsur dan senyawa kimia yang baru serta yang paling mendominasi pada komposisi campuran HMA modifikasi komposisi komposit HDPE dan CR.
4. Menjadi salah satu alternatif bagi pelaku usaha dibidang produksi aspal dalam hal perhitungan ketersediaan bahan baku utama (*agregat*) dan aspal itu sendiri dengan tidak merubah nilai fungsi dari hasil produksi yang sesuai standart yang telah ditetapkan baik melalui lembaga berwenang diwilayah hukum negara Indonesia dalam hal ini Kementrian PUPR RI atau sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI).

## 1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi hanya pada campuran aspal jenis pertamina dengan modifikasi campuran *polymer* jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) dan limbah karet sintetis (*crumb rubber/cr*) jenis limbah ban kendaraan bermotor yang divariasikan pada persentase berat campuran 4%, 5%, dan 6% dengan variasi temperatur 170°C, 200°C, dan 230°C.

## 1.6 Kebaruan Penelitian

Penelitian ini mampu memberikan informasi berdasarkan analisis dan hasil eksperimen yang telah dilakukan berupa identifikasi komposisi modifikasi material yang di campurkan secara sekaligus ataupun penggunaannya secara bersamaan sebagai material penguat pada campuran Hot Mix Asphalt (HMA).

Penelitian merupakan penelitian lanjutan yang berorientasi pada material yang ada di Indonesia secara umum dan khususnya diwilayah Provinsi Gorontalo. Peningkatan kinerja dan durabilitas jalan raya tidak hanya mengacu pada material dasar produk HMA itu sendiri, akan tetapi bisa di modifikasi

dengan menambahkan material polimer jenis HDPE dan CRB sebagai penguat. Proses pencampuran dalam eksperimen ini penulis akan menggabungkan kedua material komposit dimodifikasi dengan *Hot Mix Asphalt* dengan keunggulan ataupun performa yang dihasilkan adalah pada temperatur campuran, pembebanan yang diberikan serta unsur dan senyawa baru yang akan dihasilkan yang akan menjadi ciri khas dari campuran modifikasi tersebut. Hasil penelitian ini selain mendapatkan formulasi campuran yang ideal sesuai standar SNI juga akan memberikan informasi kepada pemerintah maupun *stakeholder* dalam hal pengolahan limbah sampah plastik jenis High Density *Poliethylene* (HDPE) dan sampah karet sintetik (*Crumb Rubber/CR*) penggunaan kendaraan bermotor. Selain pengolahan limbah sampah akan lebih optimal, performa hasil produksi HMA modifikasi pun akan memiliki umur teknis yang lebih lama pada pengaplikasiannya.

## BAB II TOPIK PENELITIAN I

### KARAKTERISTIK MODIFIKASI *HOT MIX ASPHALT* DENGAN KOMPOSISI KOMPOSIT *POLYMER* CAMPURAN PROSES PENGUJIAN MARSHALL DAN TEKAN BEBAS (*COMPRESSIVE TEST*)

#### 2.1 Abstrak

*Hot Mix Asphalt* adalah salah satu kombinasi komposisi material alam dengan aspal itu sendiri dalam kebutuhan infrastruktur jalan raya yang semakin banyak dibutuhkan. Keterbatasan bahan baku utama seperti perekat (*filer*) ataupun penutup pori pada permukaan, maka beberapa penelitian telah dilakukan untuk menambahkan dan performa *filer* utama sehingga meningkatkan beberapa nilai fungsi marshall yang meliputi *stability*, *density*, dan *flow*, dengan tidak mengabaikan perolehan nilai *Void Filled with Asphalt* (VMA), *Void in the mix* (VIM), *Void filled of Bitumen* (VFB). *Polymer* jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) dan karet sintesis berupa limbah karet (*crumb rubber/cr*) ban bekas dari kendaraan bermotor merupakan material yang murah, dan mudah didapat serta pemanfaatan limbah hasil olahan industri maupun rumah tangga. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai hasil pengujian Marshall optimum yang dihasilkan pada masing-masing campuran polymer jenis HDPE dan karet sintesis (*crumb rubber/cr*) dengan masing-masing komposisi campuran 4%, 5%, dan 6% pada temperatur 170°C, 200°C, dan 230°C. Berdasarkan komposisi campuran dan temperatur marshall optimum didapatkan untuk campuran polymer jenis HDPE didapatkan pada nilai 5% dengan temperatur 200 °C dengan *density* (kepadatan) 2.26 gr/cc, VIM (rongga dalam campuran) 3.60%, VMA (rongga dalam agregat) 15.59%, VFB (rongga terisi aspal) 78.88%, stabilitas 2409.60 kg, dan *flow* (pelelehan) 2.99 mm sedangkan untuk campuran karet sintesis (*crumb rubber*) didapatkan nilai hasil pengujian Marshall optimum pada campuran 4% dan temperatur 200°C dengan metode cacah pada ukuran saringan lolos nomor 4 tertahan nomor 16 atau sama dengan 2,375 mm nilai *density* (kepadatan) 2.26 gr/cc, VIM (rongga dalam campuran) 3.05%, VMA (rongga dalam agregat)

15.70%, VFB (rongga terisi aspal) 80.60%, stabilitas 2288.60 kg dan *flow* (pelelehan) 3.54 mm. Berdasarkan data hasil perhitungan dari penggabungan kedua jenis *filler* yang ditambahkan pada campuran HMA maka didapatkan suhu optimum berdasarkan hasil analisis marshall pada temperatur 175°C dengan nilai perolehan untuk nilai *density* (kepadatan) 2.25 gr/cc, VIM (rongga dalam campuran) 3.04%, VMA (rongga dalam agregat) 15.77%, VFB (rongga terisi aspal) 80.74%, stabilitas 2316.50 kg dan *flow* (pelelehan) 3.92 mm .

Analisis keretakan permukaan (*crack*) berdasarkan pembebanan melalui pengujian tekan bebas (*compressive test*) dengan beban alat maksimum 800 KN/cm<sup>2</sup> dengan rata-rata beban 60 KN/detik, untuk performa campuran HMA dengan *polymer* jenis HDPE dengan komposisi campuran 4% pada temperatur 200°C diperoleh beban maksimum 51,49 KN dengan rata-rata retak diperoleh 0,01 KN/mm<sup>2</sup>, untuk performa campuran HMA dengan karet sintetis dengan komposisi campuran 5% pada temperature 200°C diperoleh beban maksimum 68,169 KN dengan rata-rata retak diperoleh 0,01 KN/mm<sup>2</sup>, dan untuk penggabungan pada keduanya dengan temperatur 175°C diperoleh beban maksimum 69,974 KN dengan rata-rata retak diperoleh 0,01 KN/mm<sup>2</sup> dengan modulus elastisitas 0,341 KN/mm<sup>2</sup>

**Kata kunci:** Marshall, *Density*, VMA, VIM, VFB, *Flow*, *Stability*, *Crack*, *Compressive test*

## 2.2 Pendahuluan

Secara struktur aslinya Aspal atau bitumen adalah suatu cairan kental yang merupakan senyawa hidrokarbon dengan sedikit mengandung sulfur, oksigen, dan klor. Aspal sebagai bahan pengikat dalam perkerasan lentur mempunyai sifat viskoelastis. Aspal tampak padat pada suhu ruang padahal adalah cairan yang sangat kental. Aspal merupakan bahan yang sangat kompleks, dan secara kimia belum dikarakterisasi dengan baik. Kandungan utama aspal adalah senyawa karbon jenuh, dan tak jenuh, alifatik, dan aromatic yang mempunyai atom karbon sampai seratus lima puluh (150) per molekul. Atom-atom selain hidrogen, dan karbon yang juga menyusun aspal adalah nitrogen, oksigen, belerang, dan beberapa atom lain. Secara kuantitatif, biasanya delapan puluh persen (80%) massa aspal adalah karbon, sepuluh persen (10%) hydrogen,

enam persen (6%) belerang, dan sisanya oksigen, dan nitrogen, serta sejumlah renik besi, nikel, dan vanadium. Senyawa-senyawa ini sering dikelaskan atas aspalten (yang massa molekulnya kecil), dan malten (yang massa molekulnya besar). Biasanya aspal mengandung lima persen (5%) sampai dua puluh lima persen (25%) aspalten. Sebagian besar senyawa di aspal adalah senyawa polar.

Menurut Nugraha Yuda Pratama, dkk, 2018, aspal merupakan salah satu material yang digunakan sebagai bahan perkerasan jalan raya, material ini dipilih karena hasil akhirnya yang baik dan nyaman sebagai perkerasan lentur. Salah satu cara untuk mencegah terjadinya kerusakan pada perkerasan jalan akibat beban muatan kendaraan adalah dengan meningkatkan kualitas dan stabilitas perkerasan tersebut. Oleh sebab itu penggunaan bahan tambah (*Additive*) menjadi salah satu alternatif yang digunakan untuk mendapatkan kualitas lapis perkerasan yang baik. Aspal berasal dari alam atau dari pengolahan minyak bumi. Berkembangnya teknologi dibidang material modifikasi dapat beberapa inovasi dihasilkan dalam hal modifikasi produk diantaranya adalah aspal paduan/campuran. Aspal modifikasi yang dimaksudkan adalah komposisi aspal yang ada digabungkan dengan beberapa material diantaranya adalah *styrofoam*, abu kayu, batang bambu, daun alpukat, karet alam dan karet sintetik, limbah palstik dan masih ada beberapa material modifikasi lainnya. Berdasarkan beberapa sumber informasi dan referensi yang didapatkan, maka penelitian ini akan diorientasikan pada penggabungan atau modifikasi dua material sekaligus yaitu material limbah *polymer* (plastik) dan limbah *rubber* (karet) jenis ban bekas kendaraan bermotor.

Karakteristik material modifikasi dalam hal ini adalah limbah *polymer* (plastik) sebagai material pertama (1) secara umum diidentifikasi dengan karakteristik termal dan karakteristik fisik. Karakteristik termal yaitu keadaan termal dari plastik menggunakan *Thermo Gravimetry Analyzer* dan *Differential Scanning Calorimeter* untuk menentukan rentang temperatur dekomposisi, suhu *softening*, dan pembakaran, serta produk yang dihasilkan ketika melewati rentang temperatur tersebut, sedangkan karakteristik fisik yaitu mencakup ketebalan, kelarutan dan rentang suhu *softening*. Jenis plastik yang bisa digunakan adalah jenis *High Density Polyethylene* (HDPE).

Menurut Sofyan Saleh,dkk.2016, peningkatan volume lalu lintas yang melewati suatu ruas jalan dan rendahnya mutu konstruksi jalan menyebabkan kerusakan semakin meningkat, untuk mendukung kemampuan jalan, selain pondasi yang kuat juga diperlukan beton aspal yang baik, material yang baik dan perawatan yang baik pula. Banyak usaha telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas campuran, salah satunya dengan menggunakan aspal modifikasi polymer, yaitu aspal yang dibuat dengan mencampur aspal keras dengan polymer. Campuran aspal dengan menggunakan aspal modifikasi polymer dapat meningkatkan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi, mengatasi keretakan dan meningkatkan ketahanan yang tinggi dari kerusakan akibat penuaan sehingga dihasilkan pembangunan jalan yang lebih tahan lama serta dapat mengurangi biaya perawatan atau perbaikan jalan.

Menurut Tjitjik Wasiah Suroso, 2017, Material modifikasi kedua adalah jenis *rubber* (karet). Beberapa rujukan menunjukkan jenis karet yang bisa digunakan adalah karet alam dan karet sintetik atau karet buatan. Penggunaan karet alam adalah pada getahnya dengan sudah dilakukan proses pengawetan terlebih dahulu, dimana kandungan air yang dimiliki cukup tinggi dengan kandungan hidrokarbon yang mempunyai rantai panjang dengan ikatan rangkap yang disebut neoprane. Kelebihan dari penggunaan material modifikasi karet alam ini adalah mampu menyerap minyak (malten) yang ada dalam aspal itu sendiri sehingga menjadi kenyal, akan tetapi stuktur karet alam pun memiliki kekurangan diantaranya adalah temperatur, dimana jika temperatur pada proses pencampuran terlalu panas akan meyebabkan degradasi mutu karet alam sebagai fungsi utama. Rujukan berikutnya adalah karet dengan jenis sintetik atau karet buatan. Menurut Sri Mulyani, Dani Hamdani (2020), *Crumb Rubber* atau karet cacah yang digunakan sebagai bahan tambah terhadap bahan pengikat aspal yang terbaik adalah yang memiliki komposisi terdiri atas karet alam dan karet sintetis, dengan kadar karbon tinggi enam puluh koma empat belas persen (60,14 %), kadar polimer sebesar dua puluh lima koma empat puluh dua persen (25,42 %), *plasticizer content* sebesar empat koma sembilan persen (4,95 %), kadar debu kecil sebesar tujuh koma lima puluh tujuh persen (7,57 %), dan kadar sulfur sebesar satu koma enam puluh empat persen (1,64 %), sedangkan

sisanya adalah bahan lain yang tidak teruji. Sifat karakteristik bahan pengikat dengan menggunakan lima belas persen (15%) CR dengan kecepatan pencampuran enam ribu (6000) rpm yang terbaik pada temperatur pencampuran seratus empat puluh derajat celcius (140°C) dengan waktu pengadukan selama enam puluh (60) menit.

## 2.3 Metode

### Rancangan Kegiatan Penelitian

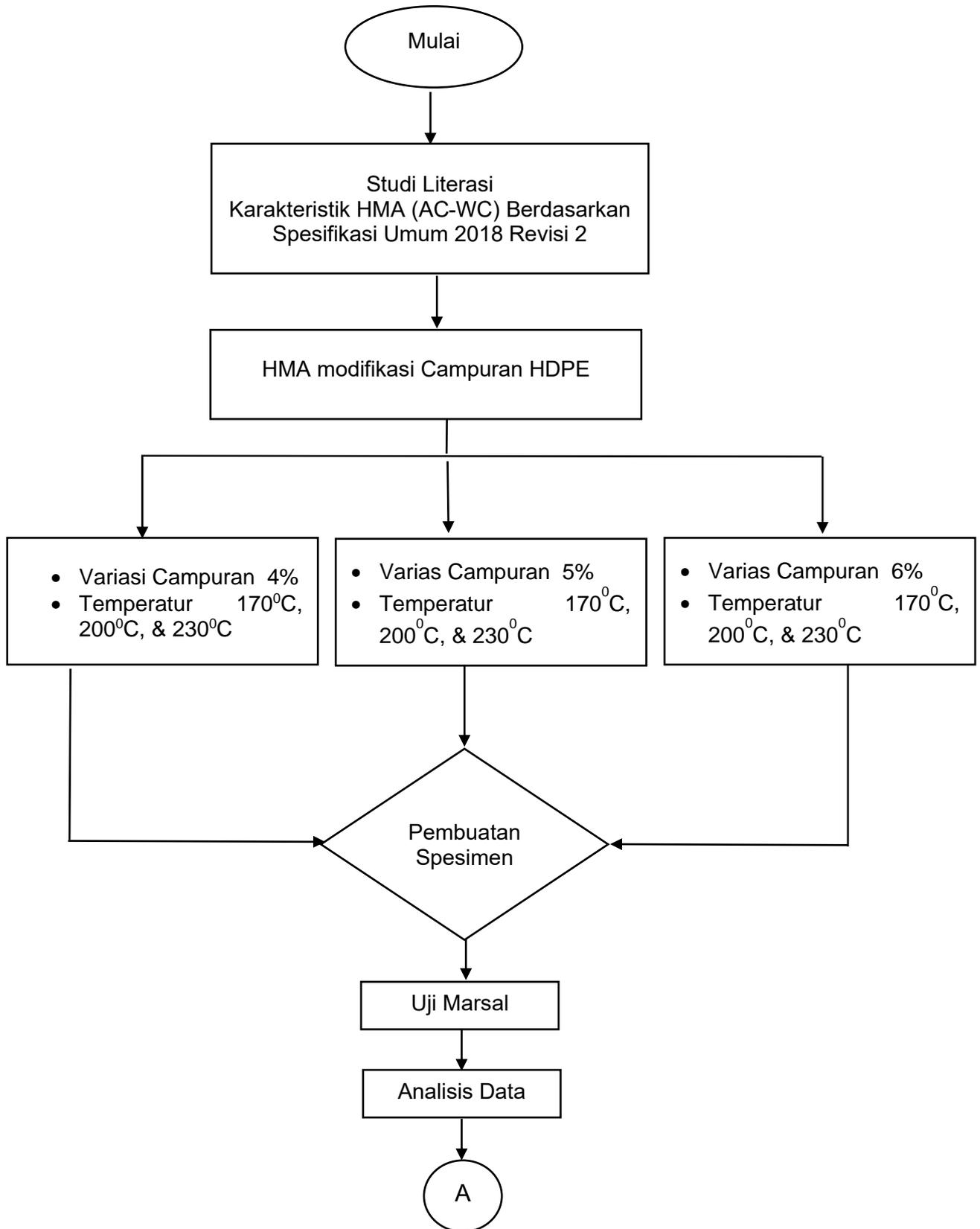
Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif adalah suatu penelitian yang pada dasarnya menggunakan pendekatan deduktif-induktif. Pendekatan ini berangkat dari suatu kerangka teori, gagasan para ahli, maupun pemahaman peneliti berdasarkan pengalamannya, kemudian dikembangkan menjadi permasalahan-permasalahan yang diajukan untuk memperoleh pembenaran (verifikasi) atau penolakan dalam bentuk dokumen data empiris lapangan. Pendekatan kuantitatif bertujuan untuk menguji teori, membangun fakta, menunjukkan hubungan antar variabel, memberikan deskripsi statistik, menaksir dan meramalkan hasilnya. Desain penelitian yang menggunakan pendekatan kuantitatif harus terstruktur, baku, formal dan dirancang sematang mungkin sebelumnya. Desain bersifat spesifik dan detail karena desain merupakan suatu rancangan penelitian yang akan dilaksanakan sebenarnya.

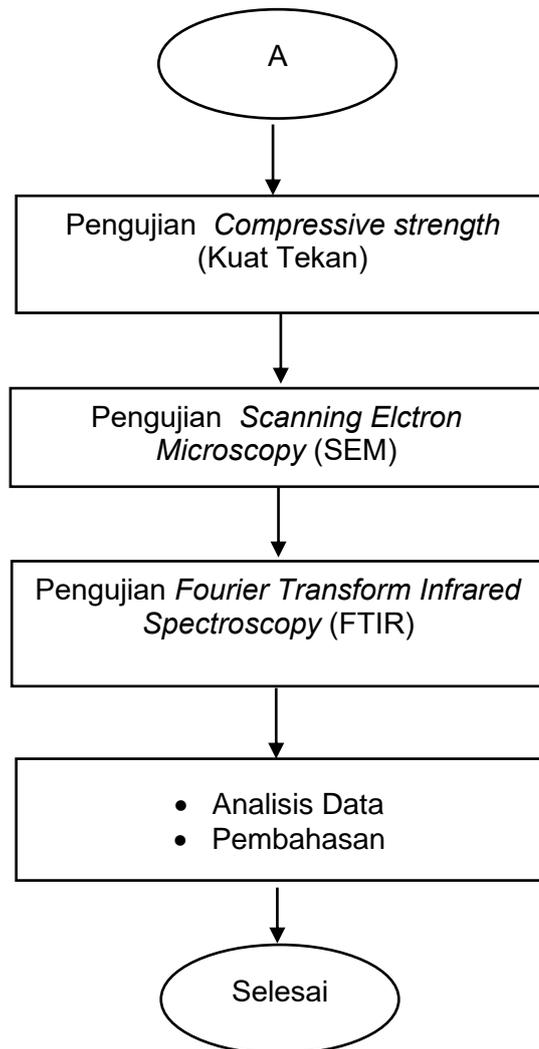
Jenis penelitian yang akan dilakukan adalah jenis penelitian Eksperimen Laboratorium yang bersifat kuantitatif. Secara teoritis jenis penelitian eksperimen adalah suatu cara untuk mencari hubungan sebab akibat (hubungan kausal) anatar dua faktor yang sengaja ditimbulkan oleh peneliti dengan mengeliminasi atau mengurangi atau menyisihkan faktor-faktor lain yang mengganggu (Arikunto, 2019, hlm. 9), Menurut Darmadi (2014, hlm. 17) eksperimen adalah suatu penelitian yang berusaha mencari pengaruh variabel tertentu terhadap variabel lain dalam kondisi yang terkontrol. Jenis penelitian yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel independen (*treatment*/perlakuan) terhadap variabel dependen (hasil) dalam kondisi yang terkendalikan. Kondisi dikendalikan agar tidak ada variabel lain (selain varibel *treatment*) yang mempengaruhi variabel dependen. Agar kondisi dapa dikendalikan maka dalam penelitian

eksperimen menggunakan kelompok kontrol dan sering penelitian eksperimen dilakukan di dalam laboratorium. Berdasarkan spesifikasi pengujian standar umum Kementerian PUPR yang mencakup enam (6) parameter yaitu *Density*, *Void In The Mix* (VIM), *Void In The Aggregate* (VITA), *Void Filled With Asphalt* (VFWA), *Stability*, dan *Flow*.

Dalam penelitian Panungkelan (2017) dijelaskan satu metode untuk pemeriksaan mutu campuran beraspal panas di laboratorium adalah metode Marshall; di perkenalkan oleh Bruce Marshall pada tahun 1939. Benda uji campuran beraspal panas dibuat dengan cara dipadatkan dalam cetakan berdiameter 4 *inch* dengan tinggi 2,5 *inch* menggunakan penumbuk dengan berat 10 lb (4.536 gram) dan tinggi jatuh 18 *inch*, sebagai interpretasi daya pemadatan dilapangan dengan menggunakan alat pemadat roda besi (*Steel Tandem Roller*) dan roda karet (*Pneumatic Tyre Roller*). Dari pengujian Marshall diperoleh hasil pemeriksaan berupa besaran-besaran Marshall yaitu Stabilitas, Flow, VIM, VMA, FVB, kepadatan, juga MQ (Spesifikasi Bina Marga tahun 2010 revisi 2) dan *Ratio FF/Bitumen* Effektif revisi 3. Bina Marga dalam spesifikasi teknik, menetapkan jumlah tumbukan untuk pembuatan benda uji Marshall pada campuran AC-WC dan AC-BC sebanyak 2 x 75 kali.

**Bagan Alir Penelitian**  
**Penelitian Tahap 1**





**Gambar 2.** Bagan Alir Proses Penelitian Tahap 1

### **Prosedur Penelitian**

Penelitian akan dilakukan dengan teknik eksperimen kuantitatif dilaboratorium, dengan pembuatan sampel eksperimen berdasarkan spesifikasi yang divariasikan pada masing-masing spesimen material substitusi diantaranya akan divariasikan pada volume, temperatur pencampuran serta dimensi spesimen benda uji.

### **Pembuatan sampel**

Cara kering adalah Metode pembuatan sampel dengan memasukkan plastik ke dalam campuran agregat dengan metode cacah dan dipanaskan pada suhu campuran, kemudian ditambahkan cairan aspal panas. Cara ini bisa lebih murah dari pada cara basah. Metode ini menawarkan cara yang lebih mudah untuk memasukkan plastik ke dalam agregat panas, tanpa memerlukan peralatan campuran lainnya.

### **Tempat dan Waktu Penelitian**

#### a. Waktu Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan mulai setelah seminar proposal disertasi pada tahun 2022.

#### b. Tempat Penelitian

1. Pengambilan material aspal, agregat kasar dan halus, di PT. Cahaya Baru Membangun, Gorontalo. Perusahaan ini di rekomendasikan oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Pemkab. Gorontalo.
2. Pembuatan spesimen benda uji dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo.
3. Proses pengujian Marshall dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo.
4. Proses pengujian *compress test* dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo dan Laboratorium Teknik Material, UNHAS, Gowa.

### **Bahan dan Alat Penelitian**

#### a) Bahan

Adapun bahan yang digunakan adalah :

1. Limbah *rubber* (karet) jenis ban bekas



**Gambar 3.** Limbah Karet (*Crumb Rubber*) Jenis Ban Bekas

2. Limbah *Polymer* (plastik) jenis *High Density Polyethylene* (HDPE)



**Gambar 4.** Limbah *polymer* (plastik) jenis *Hight Density Polyethylen*

3. Agregat yang terdiri dari halus dan kasar



**Gambar 5.** Agregat halus dan kasar

#### 4. Aspal curah pen.60/70



**Gambar 6.** Aspal Curah pen.60/70

#### b) Alat

Adapun alat yang digunakan adalah :

##### 1. *Specific gravity and absorbtion of coarse aggrearate*



**Gambar 7.** *Specific gravity and absorbtion of coarse aggregate*

##### 2. *Specific gravity and absorbtion of fine aggregate*

##### 3. *Los Angeles Abrasion test set*



**Gambar 8.** *Los Angeles Abrasion Test*

4. Sieve (3/4", 1/2", 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200)



**Gambar 9. Sieve**

5. Promotional caliver device



**Gambar 10. Propotional caliver device**

6. Softening point test set



**Gambar 11. Softening point test set**

7. *Hand-operated laboratory penetration test set*



**Gambar 12.** *Hand-operated laboratory penetration test set*

8. *Specific gravity of semi-solid bituminous materials*



**Gambar 13.** *Specific gravity of semi-solid bituminous materials*

9. *Compaction test set*



**Gambar 14.** *Compaction test set*

#### 10. Marshall Test Set



**Gambar 15.** Marshall test set

#### 11. Alat Uji Tekan (*Compressive Test Set*)



**Gambar 16.** Alat Uji Tekan (*Compressive Test*)

#### **Prosedur Penelitian**

Adapun prosedur penelitian proses *pack carburizing* dengan metode penarikan pada baja karbon adalah :

##### **1. Proses Pembuatan Briket Aspal**

- 1) Siapkan material agregat kasar dan halus yang telah dicuci bersih dan dikeringkan.
- 2) Siapkan alat ukur seperti cawan dan timbangan untuk menentukan persen berat.

- 3) Siapkan tungku atau alat pemanas dan termometer.
- 4) Proses pemanasan yang pertama dilakukan untuk aspal sampai temperatur yang ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan agregat.
- 5) Lakukan pencampuran dengan teknik pengadukan untuk agregat dan pengikat aspal.
- 6) Siapkan media cetak yang berbentuk silinder sebelum menuangkan hot mix aspal (aspal dan agregat).
- 7) Lakukan pengukuran suhu sebelum dilakukan proses pemadatan di dalam alat cetak.
- 8) Lepaskan briket aspal dari cetakan.
- 9) Siapkan alat pencatat untuk setiap aktivitas pengukuran yang dilakukan.

## **2. Proses Pembuatan Briket Aspal campuran polymer jenis HDPE**

- 1) Siapkan material agregat kasar, agregat halus dan cacahan *polymer* jenis HDPE yang telah dicuci bersih dan dikeringkan.
- 2) Siapkan alat ukur seperti cawan dan timbangan untuk menentukan persen berat.
- 3) Siapkan tungku atau alat pemanas dan termometer.
- 4) Proses pemanasan yang pertama dilakukan untuk aspal dan cacahan polymer jenis HDPE sampai temperatur yang ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan agregat.
- 5) Lakukan pencampuran dengan teknik pengadukan untuk agregat dan pengikat aspal campuran polymer jenis HDPE.
- 6) Siapkan media cetak yang berbentuk silinder sebelum menuangkan hot mix aspal (aspal campuran polymer HDPE dan agregat).
- 7) Lakukan pengukuran suhu sebelum dilakukan proses pemadatan di dalam alat cetak.
- 8) Lepaskan briket aspal campuran polymer jenis HDPE dari cetakan.
- 9) Siapkan alat pencatat untuk setiap aktivitas pengukuran yang dilakukan.

### **3. Proses Pembuatan Briket Aspal campuran karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor**

- 1) Siapkan material agregat kasar, agregat halus dan cacahan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor yang telah dicuci bersih dan dikeringkan.
- 2) Siapkan alat ukur seperti cawan dan timbangan untuk menentukan persen berat.
- 3) Siapkan tungku atau alat pemanas dan termometer.
- 4) Proses pemanasan yang pertama dilakukan untuk aspal dan cacahan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor sampai temperatur yang ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan agregat.
- 5) Lakukan pencampuran dengan teknik pengadukan untuk agregat dan pengikat aspal campuran karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor.
- 6) Siapkan media cetak yang berbentuk silinder sebelum menuangkan *hot mix* aspal (aspal campuran karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor atau *crumb rubber/cr* dan agregat).
- 7) Lakukan pengukuran suhu sebelum dilakukan proses pemadatan di dalam alat cetak.
- 8) Lepaskan briket aspal campuran karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor dari cetakan.
- 9) Siapkan alat pencatat untuk setiap aktivitas pengukuran yang dilakukan.

### **4. Proses Pembuatan Briket Aspal campuran *polymer* jenis HDPE dan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor**

- 1) Siapkan material agregat kasar, agregat halus, cacahan *polymer* jenis HDPE dan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor yang telah dicuci bersih dan dikeringkan.
- 2) Siapkan alat ukur seperti cawan dan timbangan untuk menentukan persen berat.
- 3) Siapkan tungku atau alat pemanas dan termometer.
- 4) Proses pemanasan yang pertama dilakukan untuk aspal, cacahan *polymer* jenis HDPE dan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor

sampai temperatur yang ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan agregat.

- 5) Lakukan pencampuran dengan teknik pengadukan untuk agregat dan pengikat aspal campuran cacahan *polymer* jenis HDPE dan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor.
- 6) Siapkan media cetak yang berbentuk silinder sebelum menuangkan *hot mix aspal* (aspal campuran cacahan *polymer* jenis HDPE dan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor serta agregat).
- 7) Lakukan pengukuran suhu sebelum dilakukan proses pemadatan di dalam alat cetak.
- 8) Lepaskan briket aspal campuran cacahan *polymer* jenis HDPE dan karet sintetik limbah ban kendaraan bermotor dari cetakan.
- 9) Siapkan alat pencatat untuk setiap aktivitas pengukuran yang dilakukan.

#### **Uji Marshall**

- 1) Perendaman dilakukan untuk spesimen benda uji (briket) selama 8 sampai 24 jam.
- 2) Setelah dilakukan perendaman benda uji dikeringkan kurang lebih 30 menit.
- 3) Letakan benda uji pada alat uji (mesin Marshall) dengan memperhatikan indikator-indikator berupa warna lampu dan angka yang tertera pada tampilan layar pencatat.
- 4) Proses pengujian benda uji pada mesin uji marsal berbentuk pembebanan secara horizontal pada benda uji.
- 5) Lepaskan benda uji ketika telah mengalami batas maksimum tekanan dibuktikan dengan pecahnya benda uji.
- 6) Siapkan alat pencatat untuk setiap aktivitas pengukuran yang dilakukan.

#### **Uji Tekan Bebas (*compress test*)**

- 1) Siapkan benda uji.
- 2) Letakan benda uji pada alat uji (*compress test*) dengan memperhatikan indikator-indikator berupa warna lampu dan angka yang tertera pada tampilan layar pencatat.

- 3) Proses pengujian benda uji pada mesin uji tekan bebas (*compress test*) berbentuk pembebanan secara vertikal pada benda uji.
- 4) Lepaskan benda uji ketika telah mengalami batas maksimum tekanan dibuktikan dengan pecahnya benda uji.
- 5) Siapkan alat pencatat untuk setiap aktivitas pengukuran yang dilakukan.

Berikut adalah gambar proses pembuatan spesimen benda uji yang dihasilkan adalah sebagai berikut :



**Gambar 17.** Proses Pembuatan Briket Aspal

Spesifikasi spesimen benda uji berbentuk silinder dengan diameter 10.16 cm dengan tinggi 6.35 cm dan berat 1.200 gram.



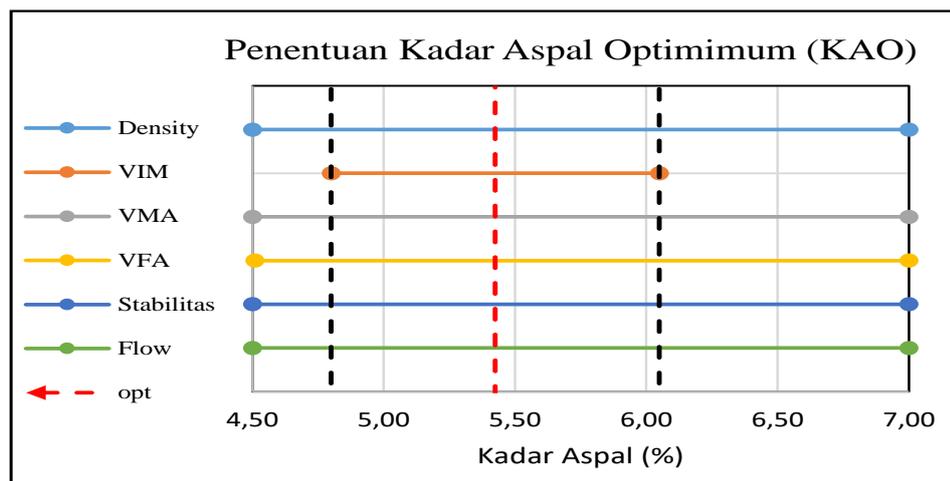
**Gambar 18.** Briket Aspal Sebagai Spesimen Benda Uji

## 2.4 Hasil dan Pembahasan

### Pengujian Marshall

#### Kadar Aspal Optimum

Aspal yang digunakan sebagai pengikat dalam merencanakan desain formula campuran aspal haruslah tepat pada kadar optimumnya. Dalam penentuan nilai kadar aspal optimum dilakukan dengan membuat diagram berdasarkan parameter Marshall yang telah didapatkan dari hasil penelitian yaitu nilai *density* (kepadatan), stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFB. Menentukan nilai tengah dari rentangan kadar aspal yang memenuhi syarat untuk jenis campuran AC-WC. nilai KAO yang didapatkan dalam penelitian ini adalah 5,40 %.



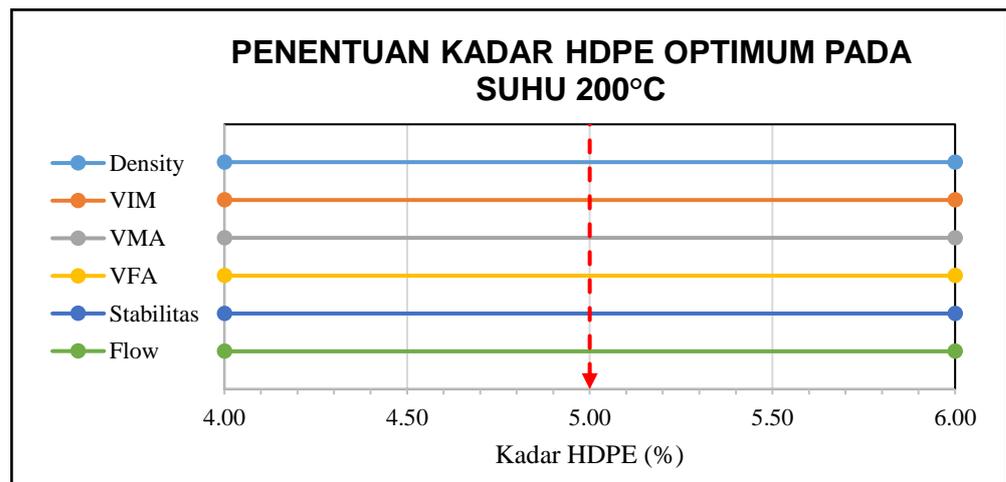
**Gambar 19.** Hasil Uji Marshall Kadar Aspal Optimum

**Tabel 1.** Hasil Uji Parameter Marshall pada KAO 5.40%

| No | Parameter                  | Satuan | Spesifikasi | Hasil  |
|----|----------------------------|--------|-------------|--------|
| 1. | Density                    | gr/cc  | -           | 2,25   |
| 2. | Rongga dalam Campuran, VIM | %      | 3 - 5       | 3,92   |
| 3. | Rongga dalam Agregat, VMA  | %      | 15          | 15,80  |
| 4. | Rongga Terisi Aspal, VFB   | %      | min. 65     | 75,18  |
| 5. | Stabilitas Marshall        | Kg     | 900         | 1986,3 |
| 6. | Pelelehan, <i>Flow</i>     | mm     | 2 - 4       | 2      |

### Campuran HDPE dan Hot Mix Asphalt

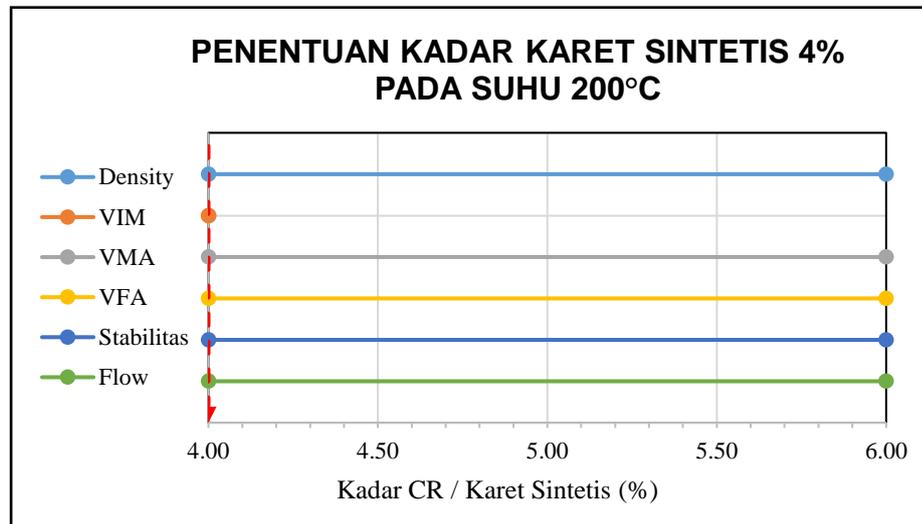
Berikut adalah hasil pengujian Marshall untuk campuran HDPE dengan HMA untuk persentase campuran 5% dengan temperatur 200°C yang menghasilkan performa terbaik untuk hasil ujinya.

**Gambar 20.** Hasil Uji Marshall Kadar HDPE 5% Suhu 200°C**Tabel 2.** Hasil Uji Parameter Marshall Campuran HMA dengan HDPE Optimum Kadar 5% pada Suhu 200°C

| No | Parameter                  | Satuan | Spesifikasi | Hasil   |
|----|----------------------------|--------|-------------|---------|
| 1  | Density                    | gr/cc  | -           | 2,26    |
| 2  | Rongga dalam Campuran, VIM | %      | 3 - 5       | 3,60    |
| 3  | Rongga dalam Agregat, VMA  | %      | 15          | 15,59   |
| 4  | Rongga Terisi Aspal, VFB   | %      | min. 65     | 76,88   |
| 5  | Stabilitas Marshall        | Kg     | 900         | 2409,60 |
| 6  | Pelelehan, <i>Flow</i>     | mm     | 2 - 4       | 2,99    |

### Campuran *Crumb Rubber* (CR) dan Hot Mix Asphalt

Berikut adalah hasil pengujian Marshall untuk campuran CR dengan HMA untuk persentase campuran 4% dengan temperatur 200°C yang menghasilkan performa terbaik untuk hasil ujinya.

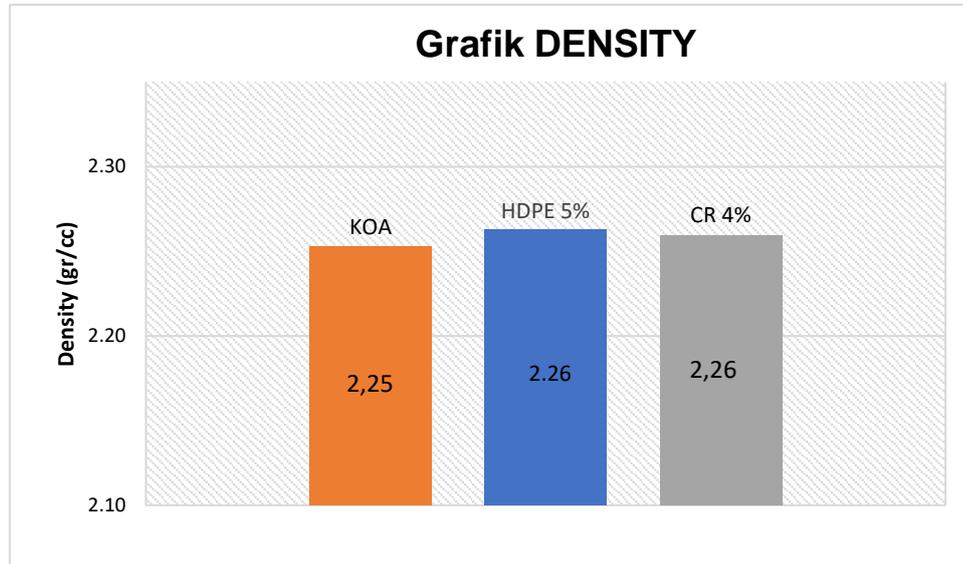


**Gambar 21.** Hasil Uji Marshall Kadar CR 4% Suhu 200°C

**Tabel 3.** Hasil Uji Parameter Marshall Campuran HMA Kadar Karet Sintetis (CR) Optimum 4% pada Suhu 200°C

| No | Parameter                  | Satuan | Spesifikasi | Hasil   |
|----|----------------------------|--------|-------------|---------|
| 1  | Density                    | gr/cc  | -           | 2,26    |
| 2  | Rongga dalam Campuran, VIM | %      | 3 - 5       | 3,05    |
| 3  | Rongga dalam Agregat, VMA  | %      | 15          | 15,70   |
| 4  | Rongga Terisi Aspal, VFB   | %      | min. 65     | 80,60   |
| 5  | Stabilitas Marshall        | Kg     | 900         | 2288,60 |
| 6  | Pelelehan, <i>Flow</i>     | mm     | 2 - 4       | 3,54    |

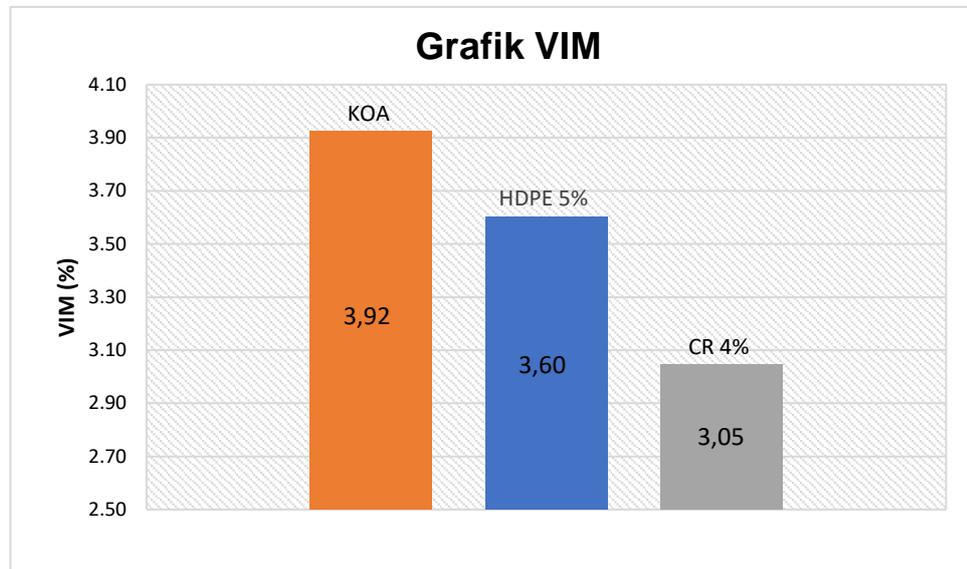
Berdasarkan hasil uji Marshall yang telah didapatkan maka berikut adalah hasil perbandingan performa HMA tanpa campuran dan HMA yang telah dimodifikasi dengan HDPE maupun CR untuk enam (6) identifikasi Marshall yang meliputi density, VIM, VMA, VFB, flow, stabilitas.



**Gambar 22.** Grafik *Density* HMA, Kadar HDPE 5% ,CR 4% Suhu 200°C

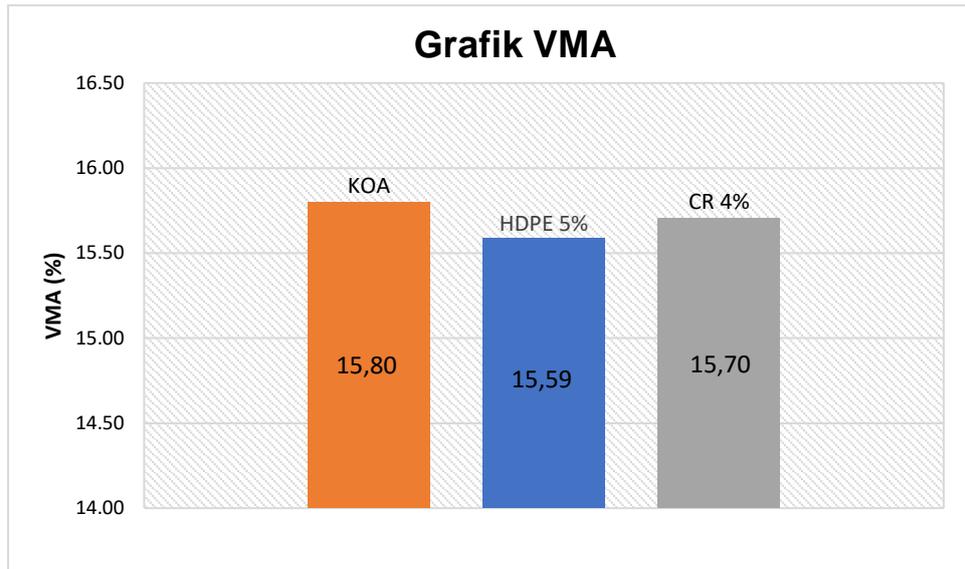
Kepadatan (*density*) adalah berat jenis campuran aspal dan dihitung dengan membandingkan berat spesimen dalam kondisi kering, dalam air, dan dalam keadaan jenuh. Kepadatan yang optimal penting untuk memastikan bahwa campuran aspal memiliki ikatan yang kuat dan tahan lama. Kepadatan pun merupakan nilai dari kerapatan suatu campuran beraspal. Setelah dilakukannya pemadatan yang sesuai dengan ketentuan spesifikasi yaitu sebanyak tujuh puluh lima (75) kali pada setiap sisi benda uji. Nilai kepadatan merupakan perbandingan antara berat benda uji di udara atau dalam keadaan kering dengan volume total benda uji, semakin tinggi nilai kepadatan suatu campuran menunjukkan bahwa kerapatannya semakin baik. Nilai yang ditunjukkan pada Gambar 22 menggambarkan bahwa, meningkatnya nilai kepadatan pada setiap penambahan kadar aspal berarti meningkat pula kepadatan dari suatu campuran beraspal. Nilai kepadatan terendah berada pada

kadar aspal tanpa campuran dengan nilai  $2.25 \text{ gr/cm}^3$  dan nilai tertinggi berada pada kadar aspal campuran HDPE 5% dan CR 4% dengan nilai  $2.26 \text{ gr/cm}^3$ .



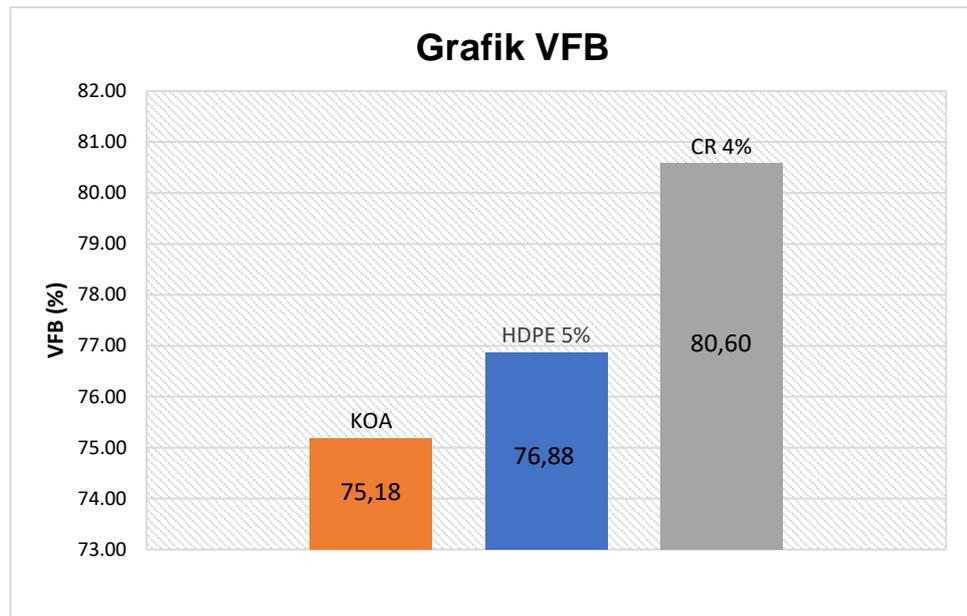
**Gambar 23.** Grafik VIM HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu  $200^{\circ}\text{C}$

*Void In Mix* (VIM) adalah rongga yang terdapat dalam total campuran. VIM dibutuhkan untuk mengetahui persentase volume pori yang masih tersisa setelah campuran HMA di padatkan. Rongga ini penting untuk memungkinkan ekspansi termal dan kontraksi, serta memungkinkan penyerapan air. Nilai VIM yang ideal memastikan keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas campuran aspal. Berdasarkan hasil gambar 23 diperoleh nilai VIM untuk HMA murni sebesar 3.92 %, untuk campuran HMA dengan HDPE 3.60 % dan campuran HMA dengan CR sebesar 3.05 %. Untuk CR menjadi rendah atau VIM nya terlalu besar dikarenakan jenis campuran yang terjadi bersifat heterogen dimana CR ini dicacah, bukan dilebur. Proses peleburan membutuhkan temperatur yang sangat tinggi pada kisaran  $230^{\circ}\text{C}$ , yang sudah tidak bersesuaian dengan standarisasi temperatur pencampuran dan pengaplikasian HMA itu sendiri yang berkisar pada temperatur  $150^{\circ}\text{C}$ - $185^{\circ}\text{C}$ . Nilai VIM pada Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2 Kementerian PU-PR RI adalah 3 - 5%, hal ini menunjukkan hasil pengujian secara menyeluruh memenuhi standar SNI.



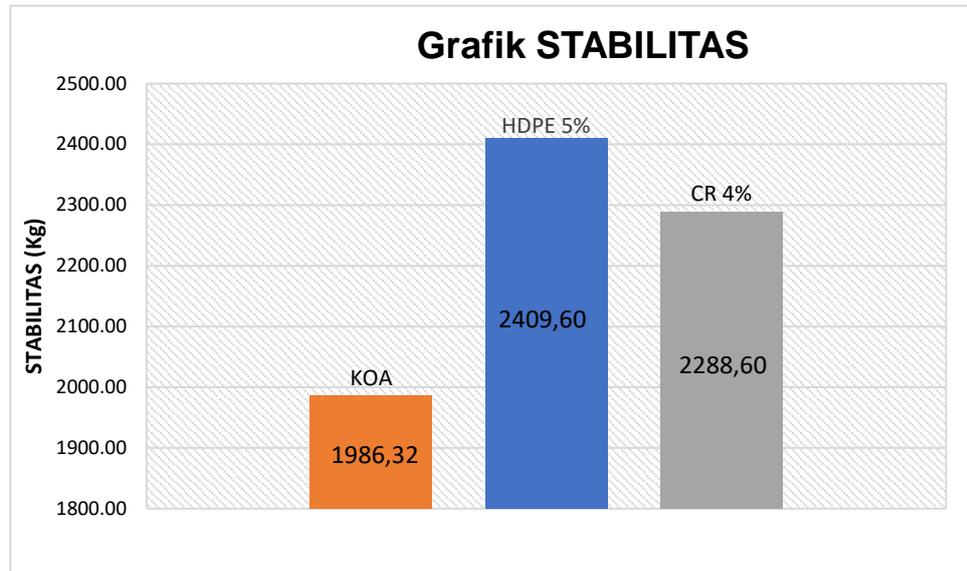
**Gambar 24.** Grafik VMA HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C

*Void in Mineral Agregat (VMA)* adalah volume udara yang terdapat dalam suatu campuran HMA yang telah padat yang dinyatakan dalam persentase. VMA menginformasikan terkait volume rongga dalam agregat yang tersedia untuk diisi dengan aspal. Nilai VMA yang cukup penting untuk memastikan adanya ruang yang cukup untuk aspal, sehingga dapat membentuk ikatan yang baik dengan agregat dan meningkatkan daya tahan campuran. Besarnya nilai VMA dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi bahan susun, jumlah tumbukan. Kuantitas rongga udara berpengaruh terhadap kinerja suatu campuran karena jika VMA terlalu kecil maka campuran bisa mengalami masalah durabilitas dan jika VMA terlalu besar maka campuran bisa memperlihatkan masalah stabilitas dan tidak ekonomis untuk diproduksi. Berdasarkan gambar 30 nilai masing-masing VMA terendah ada pada campuran HMA dengan HDPE 5% dengan nilai 15.59 %. Untuk HMA tanpa campuran dengan nilai 15.80%, HMA dengan campuran CR sebesar 15.70%, selisih yang terlihat tidak terlalu jauh dan kesemuanya memenuhi standar SNI Kementrian PU-PR Revisi 2 Tahun 2018 pada nilai 15.00 %.



**Gambar 25.** Grafik VFB HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C

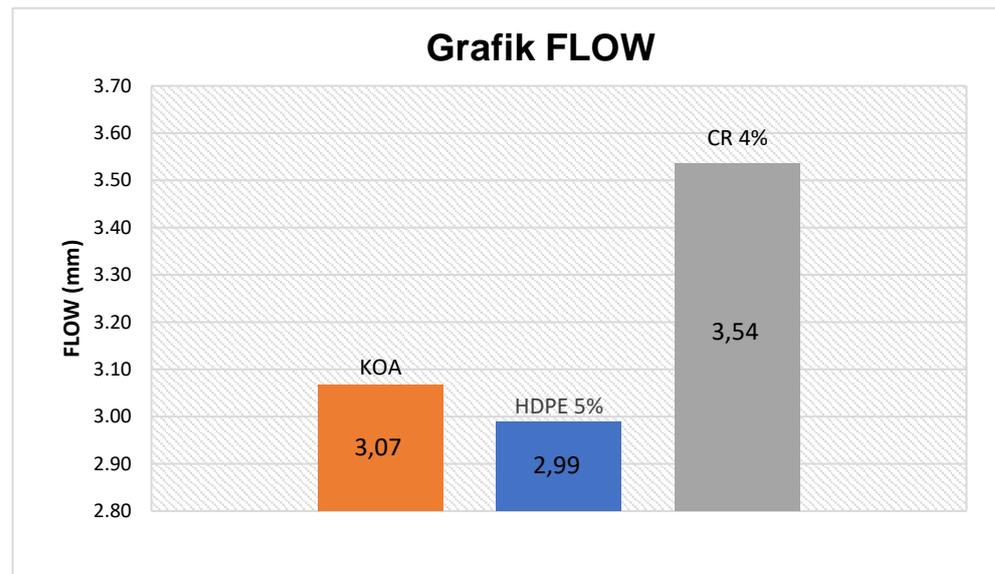
*Void filled bitumen (VFB)* adalah volume rongga pada campuran beraspal yang terisi aspal secara efektif. Nilai VFB yang baik memastikan bahwa aspal cukup mengisi rongga dalam agregat, sehingga campuran aspal menjadi lebih tahan lama dan mampu menahan deformasi. Nilai VFB yang tinggi menandakan semakin banyak rongga dalam campuran terisi aspal sehingga campuran menjadi lebih kedap air dan udara. Nilai VFB yang terlalu kecil akan menyebabkan campuran kurang kedap air dan udara sehingga campuran aspal mudah teroksidasi yang akhirnya menyebabkan lapis permukaan tidak tahan lama. Nilai yang diperoleh untuk HMA tanpa campuran sebesar 78.18 %, HMA dengan campuran HDPE 76.88 %, dan HMA dengan CR sebesar 80%. Berdasarkan gambar 25 performa terbaik VFB ada pada campuran HMA dengan CR.



**Gambar 26.** Grafik Stabilitas HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C

Stabilitas Marshall adalah ukuran kemampuan campuran HMA untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen. Stabilitas ini diukur dengan memberikan beban pada spesimen campuran HMA hingga mencapai titik kegagalan. Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan kemampuan campuran untuk menahan beban yang besar. Nilai stabilitas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti ikatan antara agregat, kadar aspal, dan juga daya ikat dari campuran. Stabilitas dibutuhkan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan perkerasan untuk menahan beban lalu-lintas tanpa menimbulkan perubahan yang tetap, seperti gelombang, alur dan *bleeding* (kegemukan/terlalu tebal). Nilai stabilitas dipengaruhi oleh gesekan antar butiran agregat (*internal friction*), penguncian antar agregat (*interlocking*), dan daya lekat (*cohesion*) serta proses pemadatan, mutu agregat dan kadar aspal juga berpengaruh. Nilai stabilitas yang terlalu tinggi akan menghasilkan campuran yang bersifat kaku dan muda retak saat menerima beban bebas, sementara nilai stabilitas yang terlalu rendah akan menghasilkan campuran HMA yang mudah mengalami *rutting* (depresi longitudinal akibat pembebanan roda. Berdasarkan gambar grafik 26 didapatkan nilai stabilitas tertinggi 2409.60 kg campuran HMA dengan HDPE, sedangkan untuk HMA tanpa campuran diperoleh nilai sebesar 1986.32 kg dan untuk campuran HMA dengan CR didapatkan nilai sebesar 2288.60 kg. Stabilitas

akan terus meningkat seiring dengan penambahan campuran pada HMA, akan tetapi terjadi penurunan pada campuran HMA dengan CR dan yang paling terendah pada HMA tanpa campuran. Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas akan mengalami penambahan performa sampai batas maksimum pembebanan dan akan mengalami kembali penurunan performa.



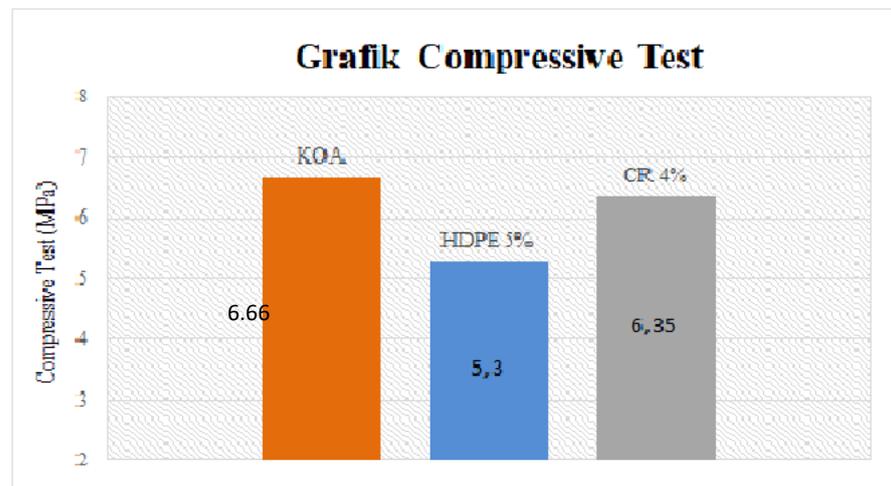
**Gambar 27.** Grafik Flow HMA, Kadar HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C

Kelelehan (*flow*) adalah besarnya deformasi benda uji yang terjadi mulai saat awal pembebanan sampai kondisi kestabilan maksimum sehingga batas runtuh dinyatakan dalam satuan milimeter (mm). *Flow* menunjukkan tingkat kelenturan suatu nilai campuran. *Flow* merupakan deformasi horizontal spesimen campuran HMA pada saat mencapai titik kegagalan selama pengujian stabilitas. Aliran ini menunjukkan fleksibilitas campuran aspal dan diukur dalam satuan milimeter. Aliran yang terlalu tinggi menunjukkan campuran yang terlalu lembek, sedangkan aliran yang terlalu rendah menunjukkan campuran yang terlalu kaku. Nilai *flow* yang tinggi dengan stabilitas rendah mengindikasikan campuran bersifat elastis dan lebih mampu mengikuti deformasi akibat beban lalu lintas, sedangkan nilai *flow* yang rendah dan stabilitas tinggi cenderung menjadi getas (*brittle*) dan kaku. Nilai *flow* dipengaruhi oleh kadar aspal, distribusi agregat dan temperatur pemadatan. Untuk HMA tanpa campuran didapatkan nilai sebesar

3.07 mm, HMA dengan HDPE sebesar 2.99 mm dan untuk campuran HMA dan CR didapatkan nilai sebesar 3.54 mm. berdasarkan data yang tersaji dalam gambar grafik 27 menunjukkan nilai flow terendah ada pada campuran campuran HMA dan HDPE. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik dari polymer jenis HDPE mampu membaaur menjadi campuran.

### **Pengujian Tekan Bebas (*Compressive Test*)**

Berikut adalah perbandingan hasil uji tekan HMA tanpa Campuran, HDPE 5%, CR 4% Suhu 200°C.

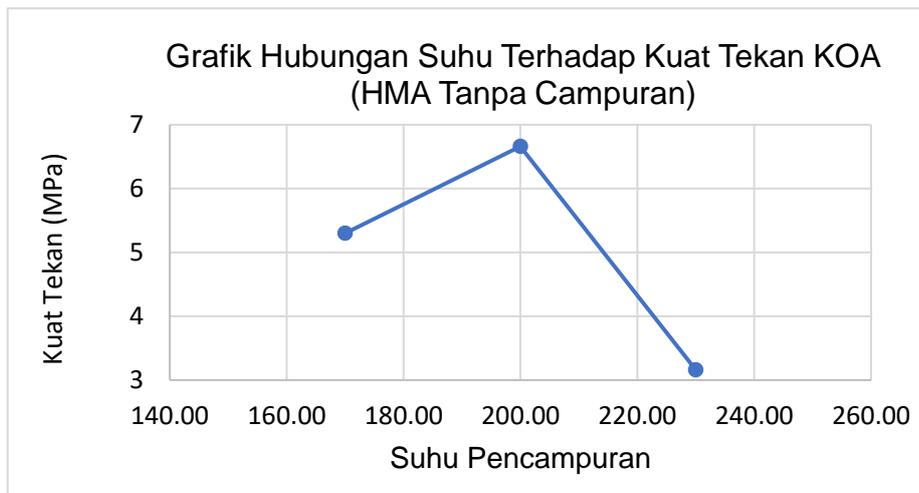


**Gambar 28.** Grafik *Compressive Test* HMA Kadar HDPE 5% ,CR 4% Suhu 200°C

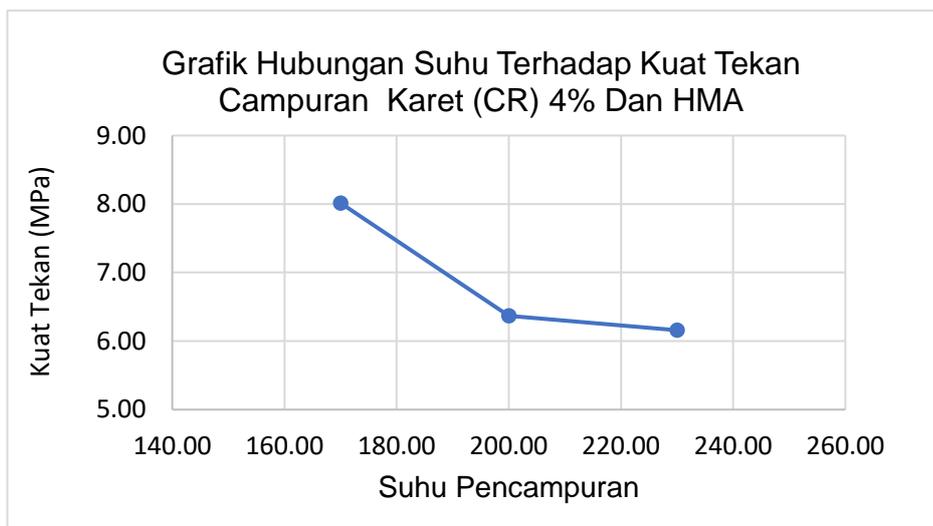
Uji tekan pada aspal adalah metode untuk mengukur kekuatan kompresi dari campuran aspal, yang mencerminkan kemampuan material tersebut untuk menahan beban tanpa mengalami kerusakan atau deformasi yang berlebihan. Uji ini dilakukan dengan memberikan tekanan secara vertikal pada spesimen aspal hingga terjadi keruntuhan atau deformasi yang signifikan. Hasil uji tekan dapat digunakan untuk menentukan apakah campuran aspal memiliki kekuatan yang cukup untuk aplikasi tertentu. Campuran dengan kekuatan tekan rendah mungkin tidak cocok untuk jalan raya dengan lalu lintas berat atau beban yang tinggi. Berdasarkan hasil gambar 28 grafik uji tekan terlihat pada HMA tanpa campuran memiliki nilai tertinggi 6.66 MPa, HMA dengan campuran HDPE

diperoleh nilai 5.3 MPa dan campuran HMA dengan CR diperoleh nilai 6.35 MPa. HMA tanpa campuran dan HMA ditambah dengan CR menunjukkan mampu merupakan komposisi terbaik dalam pembebanan secara vertikal atau dengan kata lain mampu menahan beban kendaraan ataupun lalu lintas jalan raya lainnya. Jalan raya mengalami beban dinamis yang konstan dari lalu lintas kendaraan.

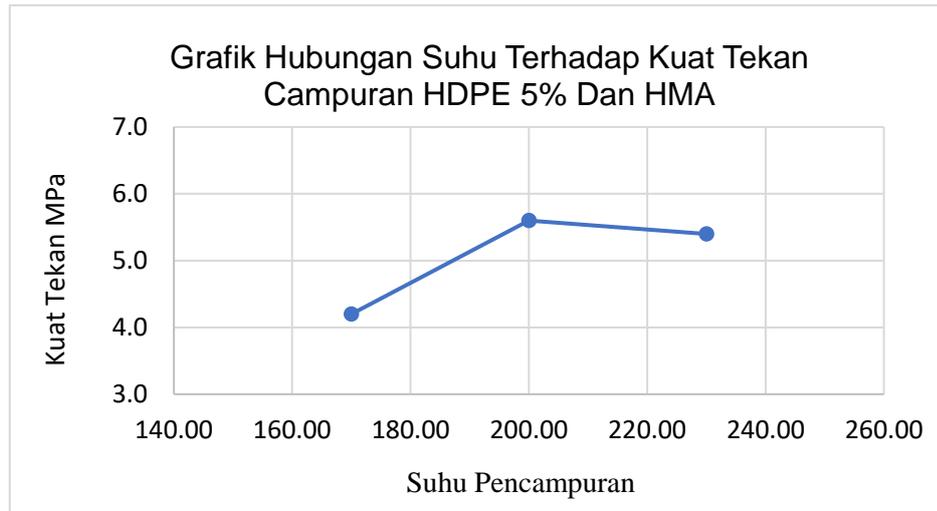
### Hubungan Antara Temperatur (Suhu) dan Kuat Tekan



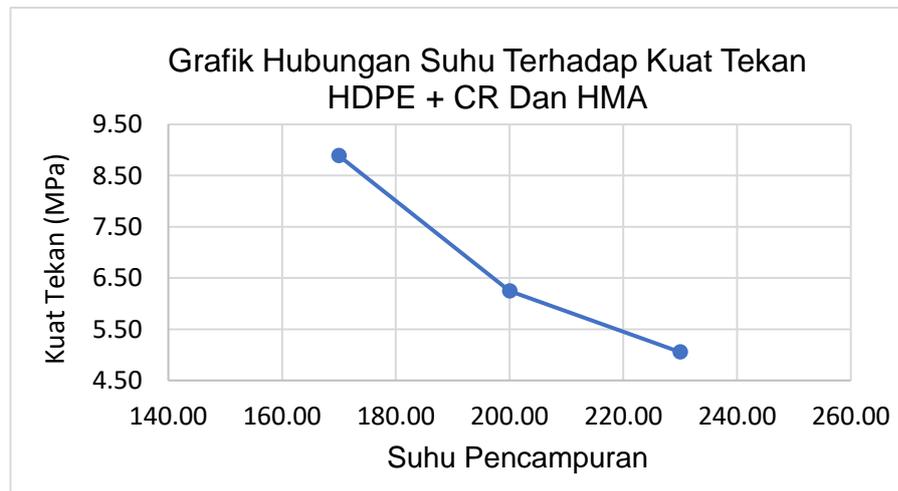
**Gambar 29.** Grafik Hubungan Suhu Terhadap Kuat Tekan KOA (HMA Murni)



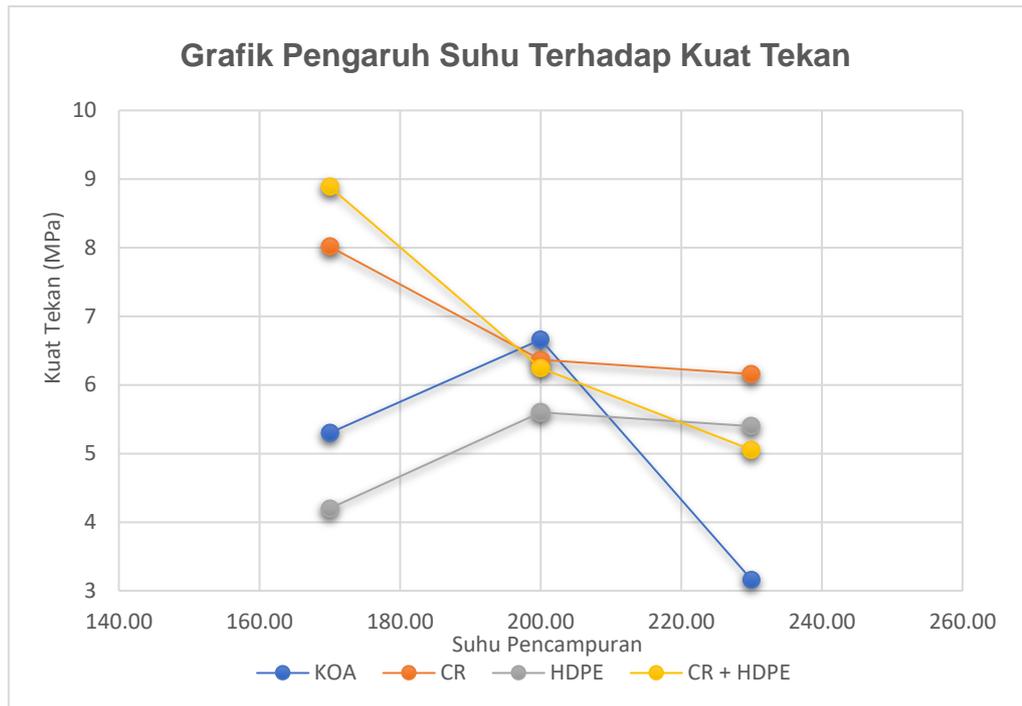
**Gambar 30.** Grafik Hubungan Suhu Terhadap Campuran CR 4% Dan HMA



**Gambar 31.** Grafik Hubungan Suhu Terhadap Campuran HDPE 5% Dan HMA



**Gambar 32.** Grafik Hubungan Suhu Terhadap Campuran HDPE 5% Dan HMA



**Gambar 33.** Grafik Gabungan Hubungan Suhu Terhadap Kuat Tekan

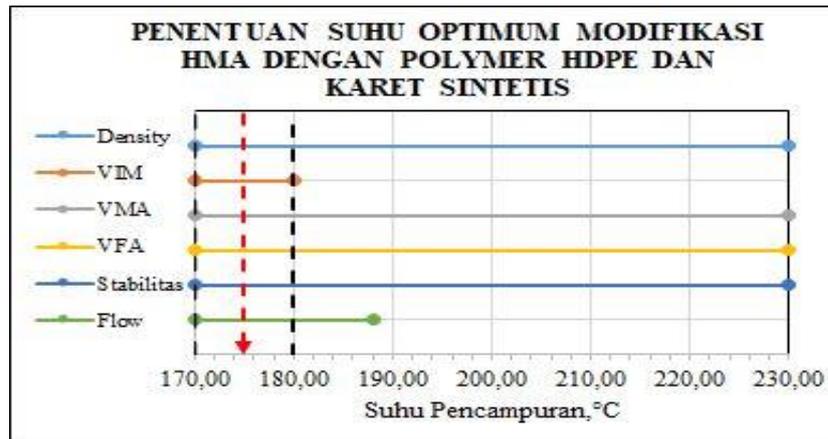
Temperatur pencampuran HMA umumnya berada dalam rentang 140°C hingga 180°C, tergantung pada jenis aspal dan agregat yang digunakan. Suhu pencampuran ini penting karena mempengaruhi :

- **Konsistensi dan Kekuatan Aspal:** Suhu yang lebih tinggi dapat membuat aspal lebih cair, memudahkan pencampuran dengan agregat, tetapi dapat juga mengurangi kekuatan aspal jika terlalu tinggi.
- **Reaksi Kimia dan Kinerja:** Suhu yang tepat memastikan reaksi kimia antara aspal dan agregat berlangsung dengan baik, menghasilkan campuran yang homogen dan berkualitas.

Hasil uji tekan dapat menunjukkan bagaimana temperatur pencampuran mempengaruhi kekuatan campuran. Kekuatan tekan yang optimal biasanya dicapai pada suhu pencampuran yang disarankan untuk jenis aspal yang digunakan. Berdasarkan gambar 33 gabungan grafik pengaruh suhu terhadap kuat tekan maka untuk kesemuanya termasuk pada temperatur (suhu) pencampuran yang ideal atau berada direntan 150°C sampai dengan 180°C. Pada grafik grafik itupun terlihat apabila pencampuran dilakukan dengan menggunakan temperatur (suhu) yang terlalu tinggi maka mengakibatkan

degradasi aspal, mengurangi ketahanan campuran terhadap beban kompresi dan umur pakai.

Berikut adalah hasil uji Marshall untuk campuran heterogen untuk HDPE, CR dan HMA secara bersamaan adalah sebagai berikut :



**Gambar 34.** Grafik Marshall temperatur Standart SNI Campuran HDPE 5% + CR 4% Dan HMA

**Tabel 4.** Hasil uji parameter Marshall pada suhu standart 175°C Campuran HMA Gabungan

| No | Parameter                  | Satuan | Spesifikasi | Hasil   |
|----|----------------------------|--------|-------------|---------|
| 1  | Density                    | gr/cc  | -           | 2,25    |
| 2  | Rongga dalam Campuran, VIM | %      | 3 - 5       | 3,04    |
| 3  | Rongga dalam Agregat, VMA  | %      | 15          | 15,77   |
| 4  | Rongga Terisi Aspal, VFB   | %      | min. 65     | 80,74   |
| 5  | Stabilitas Marshall        | gr     | 900         | 2316,50 |
| 6  | Pelelehan, Flow            | mm     | 2 - 4       | 3,92    |

## 2.5 Kesimpulan

1. Berdasarkan kinerja campuran HMA dengan HDPE dan CR biasanya menunjukkan peningkatan stabilitas dan penurunan aliran, yang menunjukkan performa yang lebih baik di bawah beban lalu lintas. VFB yang meningkat juga menunjukkan bahwa campuran mungkin lebih tahan terhadap keausan.
2. Perlu dilakukan optimasi proporsi HDPE dan CR untuk mencapai keseimbangan yang diinginkan antara stabilitas, aliran, VMA, dan VFA. Penyesuaian ini penting untuk memastikan campuran memenuhi spesifikasi teknis dan kinerja.
3. Uji Marshall dapat mengoptimalkan campuran HMA dengan HDPE dan CR untuk mendapatkan performa terbaik dan memastikan daya tahan yang lama dari infrastruktur jalan.
4. Hubungan antara pengujian Marshall dan pengujian tekan pada campuran *Hot Mix Asphalt* (HMA) memberikan gambaran tentang bagaimana kualitas campuran dapat mempengaruhi kinerja strukturalnya. Meskipun kedua pengujian ini menilai sifat yang berbeda dari campuran aspal, hasil dari satu jenis pengujian sering kali memiliki dampak langsung atau tidak langsung pada hasil pengujian lainnya.
5. Temperatur ideal akan menentukan kualitas dari produk campuran HMA yang akan dihasilkan sampai dengan pada pengaplikasiannya.

## 2.6 Daftar Pustaka

- Adhitama, A., Christady, H., Mahasiswa, H., Sistem, M., Transportasi, T., Sistem, D.M., Transportasi, D.T., 2017. Evaluasi Sebab Kerusakan Perkerasan Lentur Lintas Selatan Jawa Tengah (Ruas Jalan Kutowinangun-Prembun). *Jurnal Infrastruktur* 3.
- Amrin, M.A., Gaus, A., Darwis, M., 2017. STUDI Kuat Tarik Tidak LANGsung pada Campuran Asphalt Concrete ASBUTON 07.
- ASTM D1074 Standard Test Method for Compressive Strength of Asphalt Mixtures [WWW Document], 2017. URL <https://www.astm.org/d1074-17.html> (accessed 9.10.23).
- ASTM-C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2018. [https://doi.org/10.1520/C0039\\_C0039M-18](https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18)
- ASTM-D2166, 2000 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil [WWW Document], n.d. . MADCAD.com. URL <https://www.madcad.com/store/subscription/ASTM-D2166-00/> (accessed 9.10.23).
- Chairuddin, F., Wihardi Tjaronge, M., Ramli, M., Patanduk, J., 2016. Compressive Strength of Permeable Asphalt Pavement Using Domato Stone (Quarzite Dolomite) and Buton Natural Asphalt (BNA) Blend. *International Journal of Engineering and Technology* 8, 183–186. <https://doi.org/10.7763/ijet.2016.v6.881>
- Chen, H., Alamnie, M.M., Barbieri, D.M., Zhang, X., Liu, G., Hoff, I., 2023. Comparative study of indirect tensile and uniaxial compression tests on asphalt mixtures: Dynamic modulus and stress-strain state. *Constr Build Mater* 366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130187>
- Fauziah Badaron, S., Gecong, A., Anies, M.K., Meydinia, W., Achmad, A., Setiani, E.P., 2019. Studi Perbandingan Kuat Tarik Tidak Langsung terhadap Campuran Aspal Beton dengan menggunakan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi sebagai Filler.
- Gaus, A., Tjaronge, M.W., Ali, N., Djamaluddin, R., 2015. Compressive strength of asphalt concrete binder course (AC-BC) mixture using buton granular asphalt (BGA), in: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 657–662. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.097>
- Krebs, R.D., Walker, R.D., 1971. Aggregates, in: *Highways Materials*. McGraw-Hill, New York.
- Kurniawan, R., Setyawan, A., 2016. Pengaruh Bitumren Modifikasi Ethylene Vinyl Acetate (EVA) pada Asphalt Concerete Dan Thin Surfacing Hot

Mix Asphalt Terhadap Pengujian Unconfined Compressive Strength (UCS) Dan Indirect Tensile Strength (ITS).

- Mulyani, S., Hamdani, D., Litbang, P., Dan Jembatan, J., 2017. Optimal Mixing Technique of Crumb Rubber and 60/70 PEN Asphalt. *Jurnal Jalan-Jembatan* 34, 8–20.
- Panungkelan, K.S., H. Kaseke. Oscar, Manoppo, M.R.E., 2017. Pengaruh Jumlah Tumbukan Pemasakan Benda Uji Terhadap Besaran Marshall Campuran Beraspal Panas Bergradasi Menurut Jenis Asphalt Concrete (AC). *Jurnal Sipil Statik* 5, 541–548.
- Saifuddin, I.B., Gaus, A., Anwar, C., 2017. STUDI Studi Karakteristik Kuat Tekan Pada Campuran Asphalt Concrete Menggunakan Karakteristik ASBUTON 07.
- Sitorus, H.F., 2018. Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Tambah Campuran Aspal Pada Kekerasan Jalan AC-WC Terhadap Nilai Marshall. Universitas Medan Area, Medan.
- Suhirkam, D., Marpaung, R., Flaviana, L., 2015. Aspal Panas Jenis AC-WC Dengan Campuran Limbah Karbit Sebagai Filler 11.
- Sukirman, 2010. Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur. Bandung: NOVA.
- Syawal, Munirwansyah, M. Saleh, S., 2016. Dampak Penambahan Kapur Pada Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Nilai CBR Tanah Dasar Konstruksi Jalan. *Teknik Mesin* 6, 45–56