

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

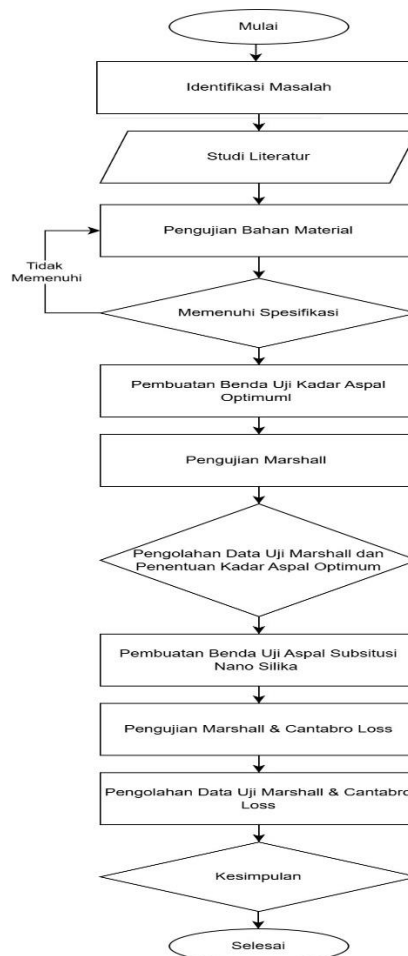
Rancangan penelitian ini menggunakan metode kuantitatif eksperimental, dengan tahapan utama berupa pengumpulan data, pengolahan material modifikasi, pembuatan benda uji, serta pengujian benda uji untuk memperoleh data.

3.2 Lokasi dan Waktu Pelaksanaan

Rancangan penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro dan dilaksanakan pada bulan Mei sampai dengan bulan Juni.

3.3 Diagram dan Alur Penelitian

Berikut adalah diagram alir yang menjelaskan proses penelitian sampa proses akhir.



Gambar 3. 1 Diagram Alir
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah terkait rendahnya stabilitas dan ketahanan aspal porus terhadap beban lalu lintas. Berdasarkan hasil studi literatur, dilakukan pengujian terhadap bahan material seperti agregat, aspal, dan nano silika untuk memastikan kesesuaiannya dengan spesifikasi. Setelah bahan memenuhi kriteria, dibuat rancangan *job mix design* untuk dua jenis campuran, yaitu aspal porus konvensional dan aspal porus dengan penambahan nano silika sebanyak 2%, 4%, dan 6%.

Selanjutnya dilakukan persiapan alat dan bahan, kemudian pembuatan sampel aspal porus sebanyak tiga sampel untuk setiap variasi. Pengujian dilakukan menggunakan *marshall test* untuk memperoleh nilai stabilitas dan *flow* sebagai indikator kinerja campuran.

Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi kadar nano silika terhadap kinerja campuran aspal porus. Dari analisis tersebut diperoleh kesimpulan mengenai kadar optimum nano silika yang mampu meningkatkan kualitas campuran tanpa mengurangi sifat porositasnya.

3.4 Metode Pengujian Bahan dan Material

3.4.1 Agregat Kasar

Tahap awal dalam proses penelitian ini adalah pengumpulan data agregat kasar, berikut ini adalah beberapa rangkaian pengujian yang dilakukan dengan spesifikasi.

1. Pengujian Analisis Saringan

Analisis saringan adalah metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butir agregat kasar yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ dan $\frac{1}{2}$ dan tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm) Pengujian ini penting untuk memastikan gradasi agregat sesuai dengan standar yang dipersyaratkan (SNI ASTM C136-2012).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Saringan
- 2) Timbangan
- 3) Shieve shaker

4) Sekop

Bahan :

- 1) Agregat lolos saringan $\frac{3}{4}$ dan $\frac{1}{2}$

b. Langkah Pengujian

Pengujian analisis saringan diawali dengan pengambilan benda uji sebanyak 5 kg agregat yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ inci dan 2,5 kg agregat yang lolos saringan $\frac{1}{2}$ inci. Sampel tersebut kemudian dicuci hingga bersih untuk menghilangkan debu atau kotoran yang menempel pada permukaan agregat. Setelah itu, agregat dikeringkan di dalam oven pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai kondisi kering permukaan.

Selanjutnya, saringan disusun berdasarkan urutan ukuran dari yang terbesar hingga terkecil, dengan pan diletakkan di bagian paling bawah untuk menampung agregat yang lolos saringan No. 200. Proses penyaringan dilakukan menggunakan shieve shaker selama 10–15 menit. Setelah proses selesai, berat agregat yang tertahan pada setiap saringan ditimbang dan dicatat sesuai dengan ukuran saringannya untuk keperluan analisis gradasi. Sebagai gambaran pengujian analisis saringan agregat kasar dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah.



Gambar 3. 2 Pengujian Analisis Saringan Agregat Kasar

Sumber : Dokumentasi Pribadi

2. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan (SNI ASTM C117-2012)

Pengujian bertujuan menentukan berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh, dan berat jenis semu dari agregat kasar, serta angka penyerapan agregat kasar. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut.

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Bak rendam air
- 2) Cawan
- 3) Keranjang kawat
- 4) Saringan $\frac{3}{4}$ dan $\frac{1}{2}$
- 5) Kain lap
- 6) Oven
- 7) Timbangan

Bahan :

- 1) Agregat lolos saringan $\frac{3}{4}$ dan $\frac{1}{2}$

b. Langkah Pengujian

Pengujian ini diawali dengan mencuci benda uji berukuran $\frac{3}{4}$ inci dan $\frac{1}{2}$ inci untuk menghilangkan debu atau tanah yang menempel pada permukaan agregat. Setelah bersih, benda uji kemudian direndam selama 24 jam untuk memastikan pori-pori agregat terisi air secara sempurna.

Selanjutnya, benda uji yang telah direndam dilap hingga kondisi SSD kemudian diambil masing-masing sebanyak 1 kg untuk setiap ukuran agregat guna dilakukan penimbangan berat dalam air (BA). Setelah itu, benda uji dikeringkan di dalam oven pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, dan setelah kering dilakukan penimbangan kembali untuk memperoleh berat kering (BK). Data dari kedua penimbangan ini digunakan untuk perhitungan sifat fisik agregat. Sebagai gambaran pengujian berat jenis dan penyerapan dapat dilihat pada gambar 3.3 dibawah.



Gambar 3. 3 Pengujian Analisis Saringan dan Penyerapan

Sumber : Dokumentasi Pribadi

3. *Lost Angeles Abrasion Test*

Bertujuan untuk menentukan kualitas dan ketahanan agregat terhadap keausan agregat, mengukur ketahanan agregat terhadap abrasi dan degradasi ketika mengalami gesekan, tumbukan, dan gilingan di dalam mesin *Los Angeles* (SNI 2417-2008).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Mesin *Los Angeles*
- 2) Saringan No.12
- 3) Oven
- 4) Timbangan
- 5) Kuat
- 6) Pan
- 7) 12 bola pejal

Bahan :

- 1) Agregat lolos saringan $\frac{1}{2}$ tertahan nomor 3/8 500 g

b. Langkah Pengujian

Pengujian *Lost Angeles Abrasion* menggunakan mesin *los angeles* diawali dengan menyiapkan bahan uji, kemudian mencuci agregat hingga bersih untuk menghilangkan debu dan tanah yang menempel. Setelah itu, benda uji dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai kondisi kering.

Selanjutnya, agregat dimasukkan ke dalam mesin *los angeles* bersama 12 bola baja pejal, lalu mesin dijalankan sebanyak 500 putaran. Setelah proses pengausan selesai, agregat dikeluarkan dan disaring menggunakan saringan No. 12. Agregat yang tertahan pada saringan kemudian dicuci dan dikeringkan kembali di dalam oven dengan suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ untuk memperoleh berat akhir yang digunakan dalam perhitungan nilai keausan agregat Sebagai gambaran pengujian *lost angeles* pada dilihat pada gambar 3.4 dibawah.



Gambar 3. 4 Pengujian Los Angeles Abrasion Test

Sumber : Dokumen Pribadi

4. Pengujian Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

Merupakan pengujian untuk mengukur atau menilai seberapa kuat daya lekat (adhesi) antara agregat dan aspal (SNI 2439-2011).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Oven
- 2) Cawan
- 3) Spatula
- 4) Wajan

5) Saringan 9,5 mm dan 6,3 mm

6) Timbangan

Bahan :

1) Agregat lolos saringan 9,5 mm dan tertahan 6,3 mm

2) Aquades

3) Aspal Cair

b. Langkah Pengujian

Pengujian ini diawali dengan menyiapkan 100 gram agregat yang lolos saringan 9,5 mm dan tertahan pada 6,3 mm, kemudian dicuci untuk menghilangkan kotoran yang menempel. Setelah bersih, agregat dipanaskan di dalam oven pada suhu 135°C – 150°C. Sementara itu, aspal sebanyak 6 gram dipanaskan hingga meleleh dalam wajan.

Agregat panas kemudian dicampurkan ke dalam aspal cair dan diaduk hingga seluruh permukaan agregat tertutup sempurna oleh lapisan aspal. Selanjutnya, campuran tersebut dimasukkan ke dalam gelas ukur 600 ml yang telah berisi 400 ml air, lalu didiamkan selama 16–18 jam. Setelah waktu perendaman selesai, dilakukan pengamatan terhadap agregat untuk menilai persentase agregat yang masih terselimuti aspal, dengan kriteria hasil yang baik bila 95% permukaan agregat tetap tertutup aspal. Sebagai gambaran dari pengujian kelekatan agregat terhadap aspal dapat dilihat pada gambar 2.5 dibawah.



Gambar 3. 5 Pengujian Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

Sumber : Dokumentasi Pribadi

3.4.2 Agregat Halus

Sama seperti agregat kasar, agregat halus juga melalui tahap pengujian, untuk pengujian agregat halus terdiri dari beberapa pengujian antara lain :

1. Pengujian Analisis Saringan

Merupakan pengujian yang bertujuan untuk menyaring Analisis saringan adalah metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butir agregat kasar yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ dan $\frac{1}{2}$ dan tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm) Pengujian ini penting untuk memastikan gradasi agregat sesuai dengan standar yang dipersyaratkan (SNI ASTM C136-2012).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Saringan
- 2) Timbangan
- 3) *Shieve scaker*
- 4) Sekop

Bahan :

- 1) Pasir 500 gram
- 2) Abu batu 500 gram

b. Langkah Pengujian

Pengujian analisis saringan untuk agregat halus diawali dengan menyiapkan masing-masing 500 gram abu batu dan pasir. Kedua material tersebut kemudian dicuci untuk menghilangkan kotoran atau material lain yang menempel pada permukaannya. Setelah bersih, sampel dikeringkan menggunakan oven pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai kondisi kering sempurna.

Selanjutnya, saringan disusun secara berurutan mulai dari ukuran terbesar hingga terkecil, dengan pan ditempatkan di bagian bawah untuk menampung material yang lolos saringan No. 200. Proses penyaringan dilakukan dengan menggunakan shieve shaker selama 10–15 menit, kemudian agregat yang tertahan pada setiap saringan ditimbang. Berdasarkan hasil penimbangan, dihitung persentase lolos, kumulatif tertahan, dan fraksi butiran hingga ketelitiannya mencapai 0,1% dari total massa kering benda uji.



Gambar 3. 6 Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus

Sumber : Dokumentasi Pribadi

2. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai berat jenis, berat jenis permukaan tanah, berat jenis semu, dan penyerapan yang dilakukan pengujian benda uji kering permukaan jenuh, kering oven, serta pengujian menggunakan picnometer (SNI ASTM C117-2012).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Cawan
- 2) Keranjang kawat
- 3) Saringan
- 4) Picnometer
- 5) Timbangan

Bahan :

- 1) Pasir 500 gram
- 2) Abu Batu 500 gram

b. Langkah Pengujian

Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus diawali dengan merendam benda uji selama 24 jam, kemudian dikeringanginkan hingga mencapai kondisi jenuh kering permukaan (SSD), yang diperiksa menggunakan metode sand cone test. Setelah itu, sampel dimasukkan ke dalam kerucut logam dan dipadatkan menggunakan batang penumbuk dengan delapan tusukan setiap sepertiga bagian untuk memastikan kepadatan merata.

Selanjutnya, disiapkan pasir sebanyak 500 gram dan piknometer yang telah ditimbang kosong. Air kemudian dimasukkan ke dalam piknometer hingga batas leher dan ditimbang kembali untuk memperoleh berat air. Setelah air dibuang, pasir dimasukkan ke dalam piknometer, lalu ditambahkan air hingga batas leher dan digoyangkan untuk mengeluarkan udara yang terperangkap. Setelah didiamkan selama 10 menit, air ditambah kembali hingga batas leher jika berkurang, lalu piknometer berisi pasir dan air ditimbang untuk memperoleh berat total (Bt).

Tahap terakhir, pasir dan abu batu dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat kering (BK). Data dari hasil penimbangan ini digunakan untuk menghitung berat jenis semu, berat jenis SSD, dan persentase penyerapan agregat halus. Sebagai gambaran dari pengujian berat jenis dan penyerapan dapat dilihat pada gambar 3.7 dibawah.



Gambar 3. 7 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Sumber : Dokumentasi Pribadi

3. Pengujian Kadar Lumpur

Dalam menentukan persentase lumpur yang terkandung akan dilakukan pengujian kadar lumpur pada agregat halus. Betujuan mengetahui kualitas dari agregat halus karena semakin banyak lumpur semakin berkurang kekuatannya (SNI 03-4428-1997).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Gelas ukue 250 cc
- 2) Saringan No. 4
- 3) Gelang Karet
- 4) Plastik

Bahan :

- 1) Abu batu
- 2) Pasir

b. Langkah Pengujian

Pengujian kadar lumpur pada agregat halus diawali dengan menyiapkan gelas ukur berkapasitas 250 cc. Benda uji kemudian dimasukkan ke dalam gelas ukur hingga mencapai tinggi 130 cc, setelah itu ditambahkan air hingga penuh dan dibiarkan hingga air meresap seluruhnya ke dalam agregat.



Gambar 3. 8 Pengujian Kadar Lumpur

Sumber : Dokumentasi Pribadi

Selanjutnya, gelas ukur dikocok selama 30 menit untuk mengendapkan partikel halus, kemudian dibiarkan semalam agar proses pengendapan berlangsung sempurna. Setelah itu dilakukan pengukuran ketebalan lapisan

pasir dan lumpur, yang digunakan untuk menentukan persentase kadar lumpur pada agregat halus. Sebagai gambaran dari pengujian kadar lumpur dapat dilihat pada gambar 3.8 diatas.

3.4.3 Aspal

Sebelum melakukan pembuatan sampel, aspal juga harus melakukan pengujian agar dapat mengetahui aspal yang digunakan sudah memenuhi standar. Pemeriksaan aspal ada beberapa beberapa pengujian yaitu :

1. Pengujian Penetrasi

Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kekerasan aspal. Pengujian ini dilakukan menggunakan jamrum penetrasi yang dilepaskan dalam waktu 5 detik (SNI 2456-2011).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Alat penetrasi set
- 2) *Waterbath*
- 3) Jarum penetrasi
- 4) Cawan logam
- 5) Mangkok
- 6) *Stopwatch*

Bahan :

- 1) Aspal cair
- 2) Air

b. Langkah Pengujian

Pengujian penetrasi aspal diawali dengan memanaskan aspal hingga mencair dan diaduk secara merata, dengan suhu maksimum 90°C di atas titik leleh dan waktu pemanasan tidak lebih dari 60 menit. Setelah itu, aspal cair dituangkan ke dalam cawan logam dan dibiarkan selama 1–2 jam pada suhu ruang hingga mengeras. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam water bath selama 1 jam untuk menyesuaikan suhu pengujian.

Selanjutnya, cawan berisi aspal diletakkan pada alat penetrasi, dan jarum dengan beban 50 gram diatur hingga menyentuh permukaan sampel. Jarum kemudian dilepaskan dan dibiarkan menembus aspal selama 5 detik. Prosedur ini diulangi sebanyak lima kali untuk setiap sampel, dan hasil pengujian dinyatakan sebagai nilai rata-rata penetrasi, yang menggambarkan tingkat kekerasan atau kelembutan aspal. Sebagai gambaran dari pengujian penetrasi dapat dilihat pada gambar 3.9 dibawah ini.



Gambar 3. 9 Pengujian Penetrasi 60/70

Sumber : Dokumentasi Pribadi

2. Pengujian Daktilitas

Pengujian daktilitas dilakukan menggunakan mesin daktilitas yang direndam air dan ditarik hingga melebihi 100cm untuk melihat kelenturan aspal (SNI 2432-2011).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Cetakkan daktilitas
- 2) *Waterbath*
- 3) Mesin Uji daktilitas

Bahan :

- 1) Aspal cair
- 2) Air
- 3) *Glycerin*

b. Langkah Pengujian

Pengujian daktilitas aspal dilakukan dengan memanaskan aspal hingga mencair pada suhu 80°C–100°C di atas titik lembek. Sebelum menuangkan aspal, cetakan daktilitas diolesi gliserin agar sampel tidak menempel. Aspal cair kemudian dituangkan ke dalam cetakan hingga penuh dan dibiarkan selama $\pm$ 30 menit hingga mencapai suhu ruang.

Selanjutnya, cetakan yang telah berisi aspal ditempatkan dalam water bath pada suhu 25°C dan dibiarkan selama 85–95 menit. Setelah proses ini, sampel dilepaskan dari dasar pelat dan sisi cetakan, lalu dipasang pada alat uji daktilitas. Pengujian dilakukan dengan menarik sampel secara konstan dengan kecepatan 5 cm/menit hingga sampel terputus, dan jarak saat aspal putus dicatat sebagai nilai daktilitas, yang menunjukkan tingkat kelenturan aspal. Sebagai gambaran dari pengujian daktilitas dapat dilihat pada gambar 3.10 dibawah ini.



Gambar 3. 10 Pengujian Daktilitas Aspal Konvensional
Sumber : Dokumentasi Pribadi

3. Pengujian Titik Lembek

Pengujian ini dilakukan didalam air yang diberikan es batu kemudian dipanaskan pada suhu tertentu sehingga bola baja harus turun disuhu $\geq 48^{\circ}$ untuk mengetahui kadar suhu pada saat pelunakan aspal (SNI 2434-2011).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Gelas beker
- 2) Cincin kuningan
- 3) Bola baja dua buah
- 4) Thermometer
- 5) Penjepit dan pemanas benda uji

Bahan :

- 1) Aspal
- 2) Air Suling
- 3) Es batu

b. Langkah Pengujian

Pengujian titik lembek aspal diawali dengan memanaskan aspal hingga mencair, kemudian dituangkan ke dalam cincin logam hingga permukaannya rata. Selanjutnya, gelas beker diisi dengan air suling dan es batu untuk menjaga suhu awal pengujian tetap rendah. Cincin berisi aspal ditempatkan pada dudukan alat uji titik lembek, dengan bola baja diletakkan di atas permukaan aspal, kemudian seluruh rangkaian dimasukkan ke dalam gelas beker.

Setelah itu, termometer dipasang di antara dua sampel uji untuk memantau perubahan suhu. Pemanas yang berada di bawah gelas beker kemudian dinyalakan, dan kenaikan suhu dicatat setiap 5°C hingga bola baja jatuh, yang menandakan bahwa aspal telah mencapai titik lembek. Sebagai gambaran dari pengujian titik lembek dapat dilihat pada gambar 3.11 dibawah.



Gambar 3. 11 Pengujian Titik Lembek
Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Pengujian Berat Jenis

Pengujian ini dilakukan menggunakan picnometer yang diisi air, picnometer diisi aspal, dan gabungan picnometer diisi aspal dan air (SNI 2441-2011).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Picnometer
- 2) *Waterbath*
- 3) Timbangan
- 4) Kompor

Bahan :

- 1) Aspal
- 2) *Aquades*

b. Langkah Pengujian

Pengujian berat jenis aspal diawali dengan menimbang piknometer kosong beserta tutupnya untuk memperoleh berat awal. Selanjutnya, piknometer diisi penuh dengan air suling (*aquades*) dan ditimbang kembali guna menentukan berat totalnya. Setelah itu, aspal dipanaskan hingga mencair, kemudian dituangkan ke dalam piknometer hingga mencapai $\frac{3}{4}$ bagian volume.

Piknometer yang berisi aspal tersebut kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat aspal dalam piknometer, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan berat jenis aspal. Sebagai gambaran dari pengujian berat jenis aspal dapat dilihat pada gambar 3.12 dibawah.



Gambar 3. 12 Pengujian Berat Jenis Aspal
Sumber : Dokumentasi Pribadi

5. Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

Pengujian ini berguna untuk mengetahui suhu terendah pada aspal akan mengalami pembakaran singkat, dan terjadi pembakaran minimal 5 detik yang disebut titik bakar (SNI 2433-2011).

a. Peralatan dan Bahan

Peralatan :

- 1) Termometer
- 2) Pemantik api
- 3) Alat *Cleveland open cup*

Bahan :

- 1) Aspal

b. Langkah Pengujian

Pengujian titik nyala dan titik bakar aspal dilakukan dengan terlebih dahulu memanaskan aspal hingga suhu maksimum 150°C. Aspal cair kemudian dituangkan ke dalam cawan *cleveland* hingga mencapai batas garis, lalu diletakkan di atas pelat pemanas. Sebuah termometer dipasang di atas permukaan benda uji untuk memantau perubahan suhu selama proses pemanasan.

Selanjutnya, pemanas dinyalakan dan kenaikan suhu dicatat setiap 5°C setelah suhu mencapai 56°C. Titik nyala ditentukan pada saat muncul percikan api pertama di permukaan aspal, sedangkan titik bakar dicatat ketika aspal terbakar secara terus-menerus selama minimal 5 detik. Hasil pengujian ini digunakan untuk menilai keamanan dan ketahanan aspal terhadap suhu tinggi selama proses pemanasan maupun aplikasi di lapangan. Sebagai gambaran dari pengujian titik nyala dan titik bakar dapat dilihat pada gambar 3.13 dibawah ini.



Gambar 3. 13 Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar
Sumber : Dokumentasi Pribadi

3.5 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji konvensional atau tanpa campuran inovatif dilakukan sebanyak tiga sampel, dengan setiap sampel memiliki kadar aspal yang berbeda, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% untuk menentukan kadar aspal optimum. Setelah proses pembuatan selesai, dilakukan pengujian *marshall* guna mengetahui nilai VIM, stabilitas, *flow*, dan MQ dari masing-masing benda uji. Hasil pengujian ini akan mendapatkan kadar aspal optimum. Setelah itu, dilakukan kembali pembuatan benda uji dengan menambahkan material inovatif berupa nano silika. Untuk aspal inovasi menggunakan campuran nano silika dibuat 18 sampel dengan pembagian 6 sampel setiap presentase campuran nano silika pada aspal porous. Sebagai gambaran dari tahapan pembuatan benda uji dapat dilihat pada gambar 3.14 – 3.17 dibawah.



Gambar 3. 14 Pengelompokan Agregat
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Proses awal pembuatan benda uji setiap jenis agregat terlebih dahulu ditimbang sesuai dengan proporsi berat yang telah dihitung, kemudian dipisahkan berdasarkan ukuran masing-masing fraksi. Setelah itu, agregat dipanaskan hingga mencapai suhu sekitar 170°C agar siap dicampurkan dengan aspal panas. Agregat yang telah mencapai suhu tersebut kemudian dimasukkan ke dalam wajan berisi aspal cair dan diaduk hingga merata, sehingga seluruh permukaan agregat terselimuti oleh aspal.



Gambar 3. 15 Pemanasan Agregat
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Selanjutnya, cetakan disiapkan dengan cara mengoleskan gliserin pada bagian dalamnya untuk memudahkan proses pelepasan sampel. Setelah itu, kertas alas diletakkan di dasar cetakan. Campuran aspal yang telah homogen kemudian dimasukkan ke dalam cetakan secara bertahap. Setiap sepertiga ($1/3$) bagian campuran ditusuk sebanyak 25 kali guna memastikan distribusi campuran yang merata di dalam cetakan. Setelah seluruh campuran tertuang, kertas alas kembali diletakkan di bagian atas campuran aspal.



Gambar 3. 16 Pemindahan Agregat Ke Dalam Cetakan
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Proses selanjutnya adalah penumbukan sebanyak 50 kali pada bagian atas dan bawah cetakan untuk memadatkan campuran. Setelah proses pemadatan selesai, benda uji didinginkan pada suhu ruang hingga suhunya sama dengan suhu lingkungan. Setelah dingin, sampel dikeluarkan dari cetakan menggunakan dongkrak. Terakhir, dilakukan penimbangan berat aspal di udara, di dalam air, dan berat permukaan kering, serta pengukuran tinggi dan diameter setiap sampel sebelum dilakukan uji *Marshall*.



Gambar 3. 17 Penumbukan Sampel
Sumber : Dokumentasi Pribadi

3.6 Pengujian Benda Uji dengan *Marshall Test*

Pengujian *marshall* merupakan metode standar yang digunakan untuk menentukan stabilitas dan *flow* pada campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan, ketahanan deformasi, dan fleksibilitas campuran terhadap beban lalu lintas.

a. Alat dan Bahan :

Peralatan :

1. Wajan
2. Kompor
3. Spatula
4. Timbangan
5. Termometer
6. Cetakan silinder
7. Dongkrak
8. *Compactor hammer*
9. *Marshall Test set*
10. *Waterbath*

Bahan :

1. Agregat kasar $\frac{3}{4}$ dan $\frac{1}{2}$
2. Pasir
3. Abu batu
4. Nano silika
5. Gliserin

6. Air

7. Kertas

Berdasarkan SNI 06-2489-2018 tentang uji *marshall*, benda uji terlebih dahulu direndam dalam *water bath* selama 30 hingga 40 menit untuk memastikan suhu benda uji merata sesuai dengan ketentuan pengujian. Setelah perendaman selesai, benda uji dikeluarkan dari *water bath* dan diletakkan pada bagian bawah alat penekan *marshall*. Selanjutnya, bagian atas penekan *marshall* dipasang dan seluruh rangkaian diletakkan pada mesin uji *marshall*. Setelah itu, dial *flow* dipasang pada salah satu ujung bagian atas penekan dan diatur pada angka nol (0). Alat penekan kemudian dinaikkan hingga menyentuh cincin penguji *marshall*, dan dial stabilitas juga diatur pada posisi nol (0). Proses pengujian dimulai dengan menyalakan mesin, lalu mencatat nilai stabilitas maksimum yang ditunjukkan oleh dial ketika jarum mulai menurun setelah mencapai puncak pembacaan. Sebagai gambaran dari pengujian *marshall* dapat dilihat pada gambar 3.18 dibawah ini.



Gambar 3. 18 Pengujian Marshall
Sumber : Dokumentasi Pribadi

3.7 Pengujian Benda Uji dengan *Cantabro Test*

Pengujian *Cantabro Test* digunakan untuk menilai ketahanan campuran aspal berpori terhadap kehilangan material (*raveling*) akibat gaya gesek dan beban lalu

lintas. Pengujian ini penting terutama untuk aspal porus, yang memiliki rongga udara besar dan mudah mengalami pelepasan agregat.

a. Alat dan Bahan :

Peralatan :

1. Dongkrak
2. Cetakan silinder
3. Thermometer
4. Timbangan
5. Wajan
6. Spatula
7. Kompor
8. Oven
9. *Los angeles machine*
10. *Compactor hammer*

Bahan :

1. Air
2. Aspal
3. Agregat (kasar dan halus)
4. Nano silika
5. Gliserin
6. Alas kertas

Berdasarkan AASTHO TP 108 tentang metode uji *cantabro*, benda uji terlebih dahulu dimasukkan ke dalam oven pada suhu $52 \pm 3^{\circ}\text{C}$ dengan tujuan untuk menghilangkan kadar air yang terdapat di dalamnya. Setelah proses pemanasan selesai, benda uji dikeluarkan dari oven dan didinginkan pada suhu ruang. Selanjutnya, dilakukan penimbangan untuk memperoleh berat awal benda uji. Kemudian, benda uji dimasukkan ke dalam mesin *Los Angeles* tanpa menggunakan bola baja dan diputar sebanyak 300 kali dengan kecepatan 30–33 rpm. Setelah proses pemutaran selesai, benda uji dikeluarkan dari mesin dan dibersihkan dari partikel-partikel halus yang terlepas selama pengujian. Terakhir,

benda uji ditimbang kembali untuk mendapatkan berat setelah pengujian, yang selanjutnya digunakan untuk analisis hasil pengujian. Sebagai gambaran dari pengujian *cantabro* dapat dilihat pada gambar 3.19 dibawah.



Gambar 3. 19 Pengujian Cantabro
Sumber : Dokumentasi Pribadi

3.8 Standar Penelitian

a. SNI 06-2489-1991

SNI 06-2489-1991 merupakan peraturan Standar Nasional Indonesia yang berisi tentang pengujian campuran aspal dengan menggunakan alat *marshall*. Standar ini juga digunakan untuk evaluasi campuran aspal dan sebagai langkah pengendalian mutu pada pekerjaan konstruksi jalan

b. AASHTO TP 108

Pada AASHTO TP 108 merupakan suatu standar untuk menentukan persentase kehilangan abrasi dalam spesimen campuran aspal menggunakan mesin abrasi *Los Angeles*. Metode ini digunakan untuk menilai daya tahan dan kualitas campuran aspal yang mempunyai pori – pori tinggi.

3.9 Metode Pengolahan Inovasi Material Nano Silika

Secara umum, nano silika diperoleh dari produk komersial seperti Aerosil atau Nano SiO₂ (Mebert et al., 2017). Ukuran partikel nano silika umumnya berada di bawah 100 nm. Proses pengolahan nano silika dapat dilakukan melalui metode *wet mixing* maupun dengan cara penambahan langsung ke dalam aspal panas pada suhu sekitar 160 – 180°C (Mebert et al., 2017). Campuran tersebut diaduk menggunakan metode *high shear mixing* selama 30–60 menit dengan kecepatan tinggi, yaitu sekitar 400 – 1000 rpm, untuk memastikan penyebaran partikel nano secara

homogen dan mencegah terjadinya penggumpalan (Xie et al., 2007). Jenis nano silika yang digunakan dalam penelitian ini adalah Gasil 200DF, yaitu *synthetic amorphous silica* yang diproduksi oleh PQ Silicas UK Ltd. Berikut adalah nano silika yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.20 dibawah.



Gambar 3. 20 Nano Silika
Sumber : Dokumentasi Pribadi